அணுக்கரு இயற்பியல்

ஆசிரியர்

கோ. பாலசுப்பிரமணியன்

தமிழ்நாட்டுப் பாடநூல் நிறுவனம்

First Edition—February, 1977

T.N.T.B.S.(C.P.) No. 740

© Government of Tamilnadu

NUCLEAR PHYSICS

G. BALASUBRAMANIAN

Price Rs. 9-20

Published by the Tamilnadu Textbook Society under the Centrally Sponsored Scheme of Production of books and literature in regional languages at the University level, of the Government of India in the Ministry of Education and Social Welfare (Department of Culture), New Delhi.

Printed out of the Paper allotted by the Government of India.

Printed by

GANESA PRINTING WORKS,
55, Muthumari Chetty Street,
Madras-600 001.

பதிப்புரை

அணுக்கரு இயற்பியல் என்ற இந் நூல், தமிழ்நாட்டுப் பாடநூல் நிறுவனத்தின் 740 ஆவது வெளியீடாகும். கல்லூரித் தமிழ்க் குழுவின் சார்பில் வெளியான 35 நூல்களையும் சேர்ந்து இதுவரை 775 நூல்கள் வெளிவந்துள்ளன. இந் நூல் மைய அரசு, கல்வி, சமூக நல அமைச்சகத்தின் 'மாநில மொழியில் பல்கலைக் கழக நூல்கள் வெளியிடும் திட்டத்தின்' கீழ் வெளியிடப்படுகிறது.

மேலாண்மை இயக்குநர்
தமிழ்நாட்டுப் பாடநூல் நிறுவனம்

பொருளடக்கம்

பக்கம்

1. குவாண்டம் எந்திரவியல் ... 1

1·1. பொருளின் இரட்டைப் பண்பு ... 1

1·2. டேவிசன் - ஜெர்மர் சோதனை ... 7

1·3. ஜி.பி. தாம்சனின் சோதனை ... 10

1·4. எலக்ட்ரான் நுண்ணோக்கி ... 11

1·5. ஐயப்பாட்டுக் கொள்கை அல்லது உறுதிப் பாடிலாமைக் கோட்பாடு ... 17

1·6. உறுதிப்பாடிலாமைக் கோட்பாட்டின் விளைவுகள் ... 22

1·7. பருப்பொருள் அலைகள் உண்டு என்பதற் கான சான்றுகள் ... 26

1·8. பொருளின் அலைக்கொள்கைக்கும் துகள் கொள்கைக்குமுள்ள வேறுபாடும் அதன் நீக்கமும் ... 27

1·9. பருப்பொருள் அலையின் இயக்கத்திற்கான சமன்பாடு, நேரச் சார்பற்ற ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாடு ... 32

1·10. குவாண்டம் எந்திரவியலின் எடுகோள்கள் ... 33

1·11. அலைச்சார்பின் இயல்பு ... 36

1·12. ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாட்டைச் சிக்கலற்ற பரிமாணமுள்ள சில குவாண்டம் இயக்கங் களில் பயன்படுத்துதல் ... 38

1·13. நேர்கோட்டுச் சீரிசை அலைவி ... 44

1·14. நேர்கோட்டுச் சீரிசை அலைவியின் ஆற்றல் ... 49

1·15. நேர்கோட்டுச் சீரிசை அலைவிக்கான அலைத் தொடர்கள் ... 50

			பக்கம்
2.	**தனிச் சார்புக் கொள்கை**	...	**54**
2·1.	முன்னுரை—தனிச் சார்புக் கொள்கையின் எடுகோள்கள்	...	54
2·2.	ஈதர்	...	56
2·3.	மைக்கல்சன் - மார்லி சோதனை	...	57
2·4.	தனிச் சார்புக் கொள்கையின் எடுகோளிலிருந்து பெறப்படும் சில முடிவுகள்	...	63
2·5.	லாரன்ட்ஸ் படிமாற்றுச் சமன்பாடுகள்	...	65
2·6.	லாரன்ட்ஸ் - ஃபிட்ஸ் ஜெரால்டு நீளக் குறுக்கம்	...	70
2·7.	ஐன்ஸ்டீனின் கால விரிவு	...	72
2·8.	திசைவேகங்களுக்கான படிமாற்று விதிகள்	...	75
2·9.	திசைவேகத்தைப் பொறுத்துப் பொருளின் நிறைமாற்றம்	...	76
2·10.	ஒரு பொருளின் நிறைக்கும் ஆற்றலுக்கும் உள்ள தொடர்பு	...	80
	பொதுச் சார்புக்கொள்கை		
(அ)	முன்னுரை	...	86
(ஆ)	முடுக்கம் பெற்ற சட்டங்கள்—ஈர்ப்புப்புலம்	...	87
(இ)	இணைமாற்றுத் தத்துவம்	...	87
(ஈ)	ஐன்ஸ்டீனின் ஈர்ப்புக் கொள்கையைச் சோதனை மூலம் உறுதிப்படுத்துதல்	...	88
(உ)	ஈர்ப்பு விசைப்புலத்தால் ஒளிக்கதிர்கள் விலகல்	...	90
(ஊ)	ஈர்ப்புப் புலத்தின் காரணமாக நிகழும் சிவப்பு நிற வரியின் இடப்பெயர்ச்சி	...	91
3.	**இயற்கைக் கதிரியக்கத்தின் தன்மைகளும் பயன்களும்**	...	**93**
3·1.	கரு உறுதி நிலை	...	93
3·2.	நியூட்ரான் புரோட்டான் தகவு	...	93
3·3.	அணுக்கருக்களின் மலிவு	...	96
3·4.	இயற்கைக் கதிரியக்கத்தின் கண்டுபிடிப்பு	...	97

			பக்கம்
3·5.	இயற்கைக் கதிரியக்கத்தின் பண்புகள்	...	98
	(அ) α-கதிர்களின் பண்புகள்	...	100
	(ஆ) β-கதிர்களின் பண்புகள்	...	101
	(இ) γ-கதிர்களின் பண்புகள்	...	102
3·6.	இயற்கைக் கதிரியக்கத் தேய்வு விதிகள்	...	102
3·7.	கதிரியக்கத் தொடர்களும் கதிரியக்க ஐசோடோப்புகளும்	...	113
3·8.	கதிரியக்கத்தை அளத்தல்	...	124
3·9.	கதிரியக்க வளர்ச்சியும் தேய்வும்	...	126
3·10.	கதிரியக்கச் சமநிலை	...	128
3·11.	α-கதிரியக்கம்	...	131
3·12.	அணுக்கரு ஆற்றல் மட்டங்கள் – தேய்வு வழிகள்—γ-கதிர்களின் தோற்றுவாய்	...	139
3·13.	β-கதிரியக்கத் தேய்வு	...	141
3·14.	(அ) நியூட்ரினோ	...	144
	(ஆ) நியூட்ரினோ கண்டுபிடிப்பு	...	146
3·15.	β-கதிரியக்கத் தேய்வில் ஆற்றல் தொடர்புகள்	...	148
3·16.	γ-கதிரியக்கம்—முன்னுரை	...	150
3·17.	γ-கதிர்களின் அலைநீளங்களை அளத்தல்	...	151
3·18.	பொருள்களில் γ-கதிர்களின் உட்கவர்ச்சி	...	152
3·19.	கதிரியக்கத்தின் மூலம் கால அளவுகளை நிர்ணயித்தல்	...	153
4.	**கதிரியக்கக் காட்டிகளும் எண்ணிகளும்**	...	**159**
4·1.	முன்னுரை	...	159
4·2.	அயனிக்கலம்	...	161
4·3.	கெய்கர் மியூலர் எண்ணி	...	162
4·4.	விகித எண்ணி	...	166
4·5.	வில்சனின் மேகக் கலம்	...	167
4·6.	குமிழ்க்கலம்	...	169
4·7.	புகைப்படக் கூழ்கள்	...	170
4·8.	மின்மினிப்பு எண்ணிகள்	...	173
4·9.	நியூட்ரான்களை எண்ணுதல்	...	173

			பக்கம்
5.	**அணுக்கருப் பண்புகள்**	...	**175**
5·1.	முன்னுரை	...	175
5·2.	கருவின் மின்னூட்டம்	...	176
5·3.	கருவின் பரிமாணம்	...	178
5·4.	அணுக்கருக்களின் ஆக்கம்	...	186
5·5.	அணுக் கருவின் மின்னழுத்த அரண் அல்லது 'கூலும் அரண்'	...	189
5·6.	அணுக்கருவின் நிறை	...	191
5·7.	பிணைப்பு ஆற்றல்	...	194
5·8.	அணுக் கருவின் தற்சுழற்சிக் கோண உந்தம்	...	199
5·9.	அணுக்கருவின் மின்காந்தப் பண்புகள்	...	202
5·10.	கருக்களின் நான்குமுனைச் சுழல்திறன்கள்	...	204
5·11.	அணுக்கரு விசைகள்	...	204
5·12.	அணுக்கரு மாதிரியமைப்புகள்	...	207
5·13	திரவத்துளி மாதிரியமைப்பு	...	210
5·14.	கூடு மாதிரி அமைப்பு	...	218
6.	**நியூட்ரான் இயற்பியல்**	...	**224**
6·1.	நியூட்ரான் கண்டுபிடிப்பு	...	224
6·2.	நியூட்ரான்களின் மூலம்	...	225
6·3.	நியூட்ரான்களைக் கண்டறிதல்	...	227
6·4.	நியூட்ரானின் தன்மைகள்	...	229
6·5.	நியூட்ரான் செயலீடுகள்	...	235
6·6.	நியூட்ரான்களின் ஈர்ப்பு	...	236
6·7.	அணுக்கருப் பிளவு	...	237
6·8.	நியூட்ரான்களைக் கொண்டு 'கருப்பிளவு' உண்டாக்குதல்	...	240
6·9.	அணுக்கருப் பிளவினின்றும் பெறப்படும் ஆற்றல்	...	242
6·10.	பிளவுத் துண்டங்கள்	...	244
6·11.	பிளவில் நிறைப்பகிர்வு	...	245
6·12.	சமச்சீர்ப் பிளவும் எதிர்ச்சீர்ப் பிளவும்	...	247

			பக்கம்
6·13.	கருப் பிளவிலிருந்து கிடைக்கும் நியூட்ரான்கள்	...	249
6·14.	தொடர் வினைகள்	...	249
6·15.	பிளவுச் செயலீட்டின் கோட்பாடு ஆற்றலை ஒட்டிய ஆராய்வு	...	250
6·16.	கருப்பிளவும், கருவின் திரவத்துளி மாதிரி அமைப்பும்	...	254
6·17.	அணு உலைகள்	...	257
6·18.	அணு உலையின் தத்துவம்	...	259
6·19.	வெப்ப நியூட்ரான் அணு உலைகள்	...	264
6·20.	தணிப்பான்கள்	...	267
6·21.	புற யுரேனியத் தனிமங்கள்	...	268
7.	**துகள் முடுக்கிகள்**	...	**277**
7·1.	முன்னுரை	...	277
7·2.	துகள் முடுக்கிகளின் வகைகள்	...	278
7·3.	காக்ராப்ட் – வால்டன் மின்னழுத்தப் பெருக்கி	...	282
7·4.	வான்டி கிராப் நிலையின் இயற்றி	...	284
7·5.	நேரியல் துகள் முடுக்கி	...	286
7·6.	லாரென்ஸின் சைக்ளோட்ரான்	...	288
7·7.	ஸிங்ரோ சைக்ளோட்ரான் அல்லது ஸிங்ரோட்ரான்	...	291
7·8.	பீட்டாட்ரான் அல்லது பீட்டா ஸிங்ரோட்ரான்	...	295
8.	**அணுக் கருச் செயலீடுகளும் செயற்கைக் கதிரியக்கமும்**	...	**929**
8·1.	முன்னுரை	...	299
8·2.	காக்ராப்ட்-வால்டன் சோதனை	...	299
8·3.	அணுக்கரு அமைப்பும், அழிவின்மைக் கோட்பாடுகளும்	...	302
8·4.	அணுக்கருச் செயலீட்டின் Q மதிப்பு	...	303
8·5.	அணுக்கருச் செயலீட்டின் கோட்பாடு	...	305

			பக்கம்
	8·6. அணுக்கருச் செயலீட்டின் வகைகள்	...	307
	8·7. அணுக்கருச் செயலீட்டின் நிகழ்திறன், முகப்பரப்பு	...	313
	8·8. அணுக்கருப் பிணைவு	...	314
	8·9. செயற்கைக் கதிரியக்கம்	...	318
	8·10. செயற்கைக் கதிரியக்கத்தின் பயன்கள்	...	320
9.	**காஸ்மிக் கதிர்கள்**	...	**322**
	9·1. முன்னுரை	...	322
	9·2. காஸ்மிக் கதிர்களின் தன்மைகள்	...	324
	9·3. குத்துயர விளைவு	...	326
	9·4. தீர்க்கரேகை விளைவு	...	328
	9·5. கிழக்கு-மேற்கு எதிர்ச் சீரமைவு	...	330
	9·6. கடல்மட்டத்தில் காஸ்மிக் கதிர்கள்	...	331
	9·7. முதல்நிலை காஸ்மிக் கதிர்களில் மின்னூட்ட ஆற்றல் நிலைகள்	...	332
	9·8. காஸ்மிக் கதிர்ப் பாறல்	...	334
	9·9. காஸ்மிக் கதிர்களின் தோற்றுவாய்	...	336
10.	**இயற்பியல் துகள்கள்**	...	**339**
	10·1. இயற்பியல் துகள்கள்	...	339
	10·2. துகள்கள் நிகழ்த்தும் இடையீட்டுச் செயல்கள்	...	342
	10·3. வலிமைமிக்க இடையீட்டுச் செயல்களை நிகழ்த்தும் துகள்கள்	...	344
	10·4. புதுமையான துகள்கள்	...	347
	பிற்சேர்க்கைகள்		
	1. பயன்படக்கூடிய இயற்பியல் மாறிலிகள்	...	350
	2. பயன்படக்கூடிய அலகு மாற்றுக் குணகங்கள்	...	352
	3. பொருள்களின் திசைவேகத்தைப் பொறுத்த நிறைமாற்றம்	...	354
	4. அடிப்படைத் துகள்கள்	...	356
	மேற்கோள் நூற்பட்டியல்	...	**358**
	கலைச்சொற்கள்	...	**359**

1. குவான்டம் எந்திரவியல்

1·1. பொருளின் இரட்டைப் பண்பு

இயற்கை தன்னை வெளிப்படுத்திக்கொள்ளும் 'ஆற்றல்', 'பொருள்' ஆகிய இரண்டையும் இயற்பியல் விவரிக்க முனைகின்றது. சில நூற்றாண்டுகளாகப் பொருள் துகள்களாலானது என்றும், ஆற்றலும் ஒருவிதத் துகள் பெட்டகமாக இருக்கக்கூடுமென்றும் பொருளின் 'துகள் கோட்பாட்டின்' (Particle theory) மூலம் கருதப்பட்டுவந்தது. ஆனால், ஒளியின் 'குறுக்கீட்டு விளைவு', 'விளிம்பு விளைவு', 'தள விளைவு' போன்ற சிறப்பு விளைவுகளைத் துகள் கோட்பாட்டின் மூலம் விளக்கமுடியவில்லை. இவற்றை ஹைகெனின் (Huygen) 'அலைக் கொள்கை'யைக் கொண்டே விளக்க முடிந்தது. ஒளியின் திசை வேகத்தைக் காண்பதற்கான ஃபூகோவின் (Foucault) சோதனை, துகள் கொள்கையினை முற்றிலும் பொய்ப்பித்தது எனலாம். ஆனால், அதே நேரத்தில் 'ஒளிமின் விளைவு', 'காம்டன் விளைவு' போன்றவற்றை அலைப் பண்பு கொண்டும் விளக்க முடியவில்லை. எனவே, பொருள் சிற்சில சோதனைகளில் அலையாகவும், வேறு பல சோதனைகளில் துகளாகவும் திகழலாம் என்று எண்ணப்பட்டது. 1924ஆம் ஆண்டு டி பிராக்லி (De Broglie) என்ற ஃபிரெஞ்சு விஞ்ஞானி பொருள்கள் அலை, துகள் ஆகிய இரண்டு பண்புகளையுமே கொண்டிருக்கலாம் என்று முடிவு செய்தார். அவர் பொதுவாக எல்லாப் பொருள்களுக்கும், குறிப்பாக எலக்ட்ரான்களுக்குமான அலைப் பண்புக் கொள்கையை விவரித்தார். இதற்கு முன்பே பிளாங்கினால் (Planck) கொடுக்கப்பட்ட ஆற்றலுக்கும் அதிர்வெண்ணுக்குமுள்ள சமன்பாடான $E=h\nu$ என்ற சமன்பாடு, டி பிராக்லியின் கோட்பாட்டிற்குத் துணையாக நின்றது என்று கூறுவது மிகையாகாது. அவர், தனிச்சார்பு கொள்கையின்படி இயங்கிக் கொண்டிருக்கிற துகளையும், பிளாங்கின் குவான்டம் ஆற்றலையும் ஒன்று சேர்த்துக் கீழ்க் காணும் சமன்பாட்டை உருவாக்கினார்.

$$E=mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} = h\nu \qquad \dots (1.1)$$

இதில் m_0 என்பது துகளின் அமைதி நிலை நிறையையும்
c என்பது ஒளியின் திசைவேகத்தையும்
u என்பது துகளின் திசைவேகத்தையும்
h என்பது பிளாங்கின் மாறிலியையும்
E துகளின் ஆற்றலையும் குறிக்கும்.

இதன்படி, இயங்குகின்ற ஒவ்வொரு துகளுக்கும் ஓர் அதிர்வெண்ணும், அதையொட்டிய அலைநீளமும் இருக்கவேண்டுமென்று அறியலாம். இயக்கத்திலுள்ள ஒவ்வொரு துகளும் ஓர் அலைப்பெட்டகத்திற்குச் (Wave packet) சமமென்றும், இவ் வலைப் பெட்டகத்தின் திசைவேகமும், துகளின் திசைவேகமும் சமமென நாம் அறியலாம். இந்த அலைப்பெட்டகம் அநேகச் சிற்றலைகளை ஒன்று சேர்ப்பதனால் உருவாகிறது எனத் தெரிகின்றது. இவற்றின் 'கட்டத் திசைவேகமும்' (Phase velocity—u), 'குழுத் திசைவேகமும்' (Group velocity—v) கீழ்க்கண்ட சமன்பாடுகளால் பெறப்படுகின்றன.

$$u = \lambda v \qquad \ldots \quad (1.2)$$

$$v = u - \lambda \frac{du}{d\lambda}. \qquad \ldots \quad (1.3)$$

சமன்பாடு (3)ஐப் பின்வருமாறு எழுதலாம்:

$$v = \lambda^2 \left(\frac{u}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda} \frac{du}{d\lambda}\right)$$

$$= -\lambda^2 \frac{d}{d\lambda}\left(\frac{u}{\lambda}\right)$$

அதாவது $v = -\lambda^3 \frac{dv}{d\lambda}$. ... (1.4)

ஓர் அலைப்பெட்டகத்தின் குழுத் திசைவேகத்திற்கும் கட்டத் திசைவேகத்திற்குமுள்ள தொடர்பைச் சமன்பாடு (1.3) விவரிக்கிறது. இது முதன்முதலாக 'இராலே' (Raleigh) என்ற விஞ்ஞானியால் தருவிக்கப்பட்டது. ஆனால், மைக்கல்சன் என்பவர் தாம் சோதனைமூலம் கார்பன்-டை-சல்பைடு (CS_2) திரவத்தில் ஒளியின் திசைவேகத்தை அறிந்தார். இவர் கார்பன்-டை-சல்பைடு திரவத்தில் ஒளிவிலகல் எண்ணைக் கண்டுபிடித்து அதன்மூலம் ஒளியின் 'கட்டத் திசைவேக'த்தைக் கண்டுபிடித்தார். இவருடைய சோதனையிலிருந்து ஒளியின் 'குழுத் திசைவேகம்' அதன் கட்டத் திசைவேகத்தை விட 6.8 விழுக்காடு குறைந்துள்ளது

என்பது தெரியவந்தது. இதையே இராலேயின் கொள்கையும் மெய்ப்பித்ததால் சமன்பாடு (1.3) சோதனைமூலம் உண்மைப் படுத்தப்பட்டது என்று கொள்ளலாம். சமன்பாடு (1.1)-க்கு λ-வைப் பொறுத்து வகைகெழு காணில்,

$$m_0 c^2 \frac{\beta}{(1-\beta^2)^{3/2}} \cdot \frac{d\beta}{d\lambda} = h\frac{d\nu}{d\lambda} \qquad \ldots (1.5)$$

$$\left[\beta = \frac{V}{c}\right] \qquad \left[\begin{array}{l} V = \nu\lambda \\ \nu = \frac{V}{\lambda} \end{array}\right]$$

என்பது கிடைக்கும். அதாவது,

$$m_0 c^2 \frac{\beta}{(1-\beta^2)^{3/2}} \cdot \frac{d\beta}{d\lambda} = h\frac{d}{d\lambda}\left(\frac{V}{\lambda}\right)$$

$$= \frac{-h \cdot V}{\lambda^2} = \frac{-h\beta c}{\lambda^2}$$

அல்லது $\frac{m_0 c}{(1-\beta^2)^{3/2}} \cdot \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{-h}{\lambda^2}$ ... (1.6)

அதாவது $\frac{m_0 c}{(1-\beta^2)^{3/2}}\, d\beta = -h\frac{d\lambda}{\lambda^2}$.

இதனைத் தொகைகெழு செய்தால்

$$m_0 c \int \frac{d\beta}{(1-\beta^2)^{3/2}} = -h\int\frac{d\lambda}{\lambda^2}$$

i.e. $m_0 c \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} = mV = \frac{h}{\lambda}$.

அல்லது $\boxed{\lambda = \frac{h}{mV} = \frac{h}{p}}$ ... (1.7)

என்ற சமன்பாடு கிடைக்கும்.

சமன்பாடு (1.7), இயக்கத்திலுள்ள துகளின் துகள்-அலை நீளத்தைக் கொடுக்கிறது. இச் சமன்பாடு முதன் முதலாக டி பிராக்லியால் தருவிக்கப்பட்டது.

சமன்பாடு (1.7) ஐச் சமன்பாடுகள் (1.1), (1.2) ஆகியவற்றுடன் இணைக்கும்போது,

$$u = \lambda\nu = \frac{h}{mv}\left(\frac{mc^2}{h}\right) = \frac{c^2}{V} \qquad \ldots (1.8)$$

என்ற சமன்பாடு கிடைக்கும். இச் சமன்பாட்டின்படி, டி பிராக்லி அலைகளின் கட்டத் திசைவேகம் வெற்றிடத்தில் ஒளியின் திசை வேகத்தைக் காட்டிலும் அதிகமாக உள்ளது என்பது புலனு கின்றது. ஆயினும், இது தனிச் சார்பு கொள்கைக்கு முரண் பட்டதன்று எனலாம். ஏனெனில், ஓர் அலையின் ஆற்றல் அவ் வலை யின் குழுத் திசைவேகத்தோடுதான் இயங்குகிறது. இதிலிருந்து டி பிராக்லியின் அலைகள் மற்ற அலைகளைப் போன்றிரா என்பது தெளிவாகின்றது.

மாதிரிக் கணக்கு 1

1000 வோல்ட்டு மின்னழுத்தத்திற்குட்பட்ட ஆற்றல் ஓர் எலக்ட்ரானின் டி பிராக்லி அலைநீளத்தை ஆங்ஸ்ட்ராம் (Angström) அலகுகளில் கணக்கிடுக.

எலக்ட்ரானின் ஆற்றலை எலக்ட்ரான் வோல்ட்டுகளில் தெரிந்துகொண்டோமானால், அதன் அலைநீளத்தைக் கணக் கிடுவது எளிது.

ஓர் எலக்ட்ரான் V வோல்ட்டு மின் அழுத்தத்திற்கு உட்பட் டிருக்கிறது என்று கொள்வோம்.

1 வோல்ட்டு $= \dfrac{10^8}{2{\cdot}997925 \times 10^{10}}$ நிலைமின் அலகுகள்

எலக்ட்ரானின் ஆற்றல் $=$ eV வோல்ட்டுகள்

$= \dfrac{e.\ V.\ \ 10^8}{2{\cdot}997925 \times 10^{10}}$ நிலைமின் அலகுகள்.

இது அந்த எலக்ட்ரானின் இயக்க ஆற்றலுக்குச் சமம். எலக்ட்ரானின் நிறை 'm' ஆகவும் அதன் திசைவேகம் V ஆகவும் இருக்குமேயானல்,

$$\frac{e \times V \times 10^8}{2{\cdot}997925 \times 10^{10}} = \tfrac{1}{2}\, mv^2 \text{ எர்குகள்.} \qquad \ldots \quad (1)$$

$$\text{ஆனல்,} \quad \lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{h}{mv}. \qquad \ldots \quad (2)$$

இதற்கு இருமடி கண்டால், $\lambda^2 = h^2/m^2\, v^2$

சமன்பாடுகள் (1), (2) ஆகியவற்றைப் பெருக்கினல்,

$$\frac{\lambda^2 \times eV \times 10^8}{2{\cdot}997925 \times 10^{10}} = \frac{h^2}{m^2 v^2} \times \tfrac{1}{2}\, mv^2.$$

$$\therefore \quad \lambda = \sqrt{\frac{2{\cdot}997925 \times 10^2 \times h^2}{2me}} \times \sqrt{\frac{1}{V}}$$

என்பது கிடைக்கின்றது.

இதில், $h = 6{\cdot}6256 \times 10^{-27}$ எர்கு-விநாடி

$m = 9{\cdot}1091 \times 10^{-28}$ கிராம்

$e = 4{\cdot}80298 \times 10^{-10}$ நிலைமின் அலகு

என்ற மதிப்புகளைப் பதிலீடு செய்தால்,

$$\lambda = \sqrt{\frac{2{\cdot}997925 \times 10^2 \times (6{\cdot}6256 \times 10^{-27})^2}{2 \times 9{\cdot}1091 \times 10^{-28} \times 4{\cdot}80298 \times 10^{-10}}} \times \sqrt{\frac{1}{V}}$$

$$= \frac{12{\cdot}27 \times 10^{-8}}{\sqrt{V}}$$

(இந்தச் சமன்பாடு λ-விற்கும் மின்னழுத்தம் V-க்கும் உள்ள தொடர்பைத் தருகின்றது. இங்கு மின்னழுத்தம் $V = 1000$ வோல்ட்டுகள்.)

அல்லது, $\lambda = \dfrac{12{\cdot}27}{\sqrt{V}}$ ஆங்ஸ்ட்ராம் அலகுகள்.

இங்கு $\lambda = \dfrac{12{\cdot}27}{\sqrt{1000}}$ ஆ. அ. $= 0{\cdot}388$ ஆ. அ.

மாதிரிக் கணக்கு 2

10^3 வோல்ட்டு மின் அழுத்தத்தில் ஒரு புரோட்டானுடைய டி பிராக்லி அலைநீளத்தை ஆங்ஸ்ட்ராம் அலகுகளில் கணக்கிடுக.

இங்கு $\lambda = h/mv$; மேலும்,

$$E = \tfrac{1}{2} m v^2 = \frac{eV \times 10^8}{2{\cdot}997925 \times 10^{10}}$$

$$\therefore \quad \lambda = \sqrt{\frac{299{\cdot}7925\, h^2}{2meV}}$$

இதில், $h = 6{\cdot}6256 \times 10^{-27}$ எர்கு-விநாடி

$m = 1{\cdot}67252 \times 10^{-24}$ கிராம் (புரோட்டானின் நிறை)

$e = 4{\cdot}80298 \times 10^{-10}$ நிலைமின் அலகுகள்

எனவே,

$$\lambda = \sqrt{\frac{299{\cdot}7925 \times [6{\cdot}6256 \times 10^{-27}]^2}{2 \times 1{\cdot}67252 \times 10^{-24} \times 4{\cdot}80298 \times 10^{-10} \times 10^3}}$$

$= 9{\cdot}448 \times 10^{-11}$ செ. மீ.

$= 9{\cdot}448 \times 10^{-3}$ ஆ. அ.

$= 0{\cdot}009448$ ஆங்ஸ்ட்ராம் அலகுகள்.

மாதிரிக் கணக்கு 3

10^5 எலக்ட்ரான் வோல்ட்டு ஆற்றலுடைய புரோட்டானின் திசைவேகத்தையும், டி பிராக்லி அலைநீளத்தையும் பின்வரும் புள்ளி விவரங்களின் துணைகொண்டு கணக்கிடுக.

புரோட்டானின் நிறை	$= 1{\cdot}66 \times 10^{-24}$ கிராம்.
எலக்ட்ரானின் மின்னூட்டம்	$= 4{\cdot}8 \times 10^{-10}$ நிலைமின் அலகுகள்.
பிளாங்க் மாறிலி	$= 6{\cdot}62 \times 10^{-27}$ எர்கு-விநாடி.
புரோட்டானின் ஆற்றல்	$= 10^5$ எ. வோ.
அதாவது $\frac{1}{2}mv^2$	$= 10^5$ எ. வோ.

இங்கு 'm' என்பது புரோட்டானின் நிறையையும், 'V' என்பது அதன் திசைவேகத்தையும் குறிக்கும்.

எனவே, $\frac{1}{2}mv^2 = 10^5 \times 1{\cdot}6 \times 10^{-12}$ எர்குகள்.

[1 எ. வோ. $= 1 \times 4{\cdot}8 \times 10^{-10} \times \frac{1}{300}$
$= 1{\cdot}6 \times 10^{-12}$ எர்குகள்]

அல்லது, $$v^2 = \frac{2 \times 10^5 \times 1{\cdot}6 \times 10^{-12}}{m}$$

(i) $$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5 \times 1{\cdot}6 \times 10^{-12}}{1{\cdot}66 \times 10^{-24}}}$$

$= 4{\cdot}47 \times 10^8$ செ.மீ./விநாடி

$= 4{\cdot}47 \times 10^6$ மீ./விநாடி

(ii) டி பிராக்லி அலைநீளம்

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mE}}.$$

$$\therefore \quad \lambda = \frac{6\cdot62 \times 10^{-27}}{\sqrt{2 \times 1\cdot66\times10^{-24} \times 10^{5}\times1\cdot6 \times 10^{-12}}}$$

$$= 9\cdot3 \times 10^{-12} \text{ செ.மீ.}$$

$$= 9\cdot3 \times 10^{-14} \text{ மீட்டர்.}$$

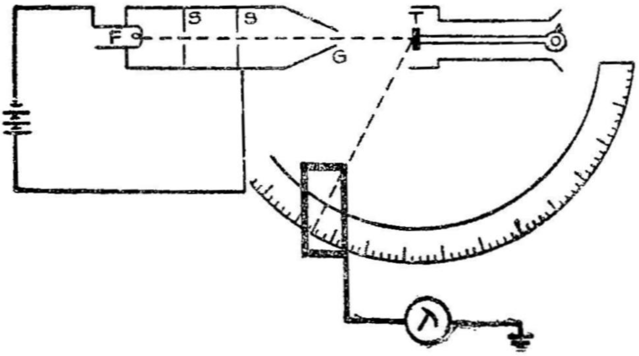
1·2. டேவிசன் - ஜெர்மர் சோதனை (Davisson-Germer Experiment)

பொருள்கள் அலைப்பண்பைக் கொண்டிருப்பதால் அவை எதிரொளித்தல் (Reflection), குறுக்கீட்டு விளைவுக்குள்ளாதல் (Interference), விளிம்பு விளைவு (Diffraction) போன்ற நிகழ்ச்சிகளைக் காட்டவேண்டும். இத்தகைய சோதனைகட்கு எலக்ட்ரான்கள் ஏற்ற பொருள் - துகள்களாகப் பயன்படுத்தப்பட்டன. எலக்ட்ரானின் டி பிராக்லி அலைநீளம், *X*-கதிர்களின் அலைநீளங்களுக்கு ஒப்ப இருப்பதால், '*X*-கதிர் விளிம்பு விளைவு' போன்ற சோதனைகளை எலக்ட்ரான்களைக் கொண்டும் நிகழ்த்த முடியும் என்பது தெளிவாகின்றது.

எலக்ட்ரான்களின் விளிம்பு விளைவுச் சோதனையை முதன் முதலில் டேவிசன், ஜெர்மர் என்ற இரு விஞ்ஞானிகள் நிகழ்த்தினார்கள். இவர்கள், எலக்ட்ரான்களை நிக்கல் படிகத்தின்மீது (Nickel crystal) விழச்செய்து, அவை சிதறுவதைச் சோதனை மூலம் கண்டறிந்தனர். இச் சோதனை ரூதர்ஃபோர்டின் α-துகள் சிதறல் (α-particle scattering), காம்ப்டனின் ஃபோட்டான் சிதறல்(Compton effect)போன்ற சோதனைகளைப்போன்று இருந்தது எனக் கூறுதல் மிகையாகாது. எலக்ட்ரான் கற்றை ஒன்றை நிக்கல் இலக்கின்மீது விழச்செய்து வெவ்வேறு திசைகளில் சிதறுகின்ற எலக்ட்ரான்களின் செறிவை அவர்கள் சோதனை மூலம் கணக்கிட்டனர். அவர்களால் பயன்படுத்தப்பட்ட ஆய்கருவி படம் (*1.1*)-ல் காட்டியதுபோல் அமைந்துள்ளது.

F என்ற டங்ஸ்டன் இழை சூடேற்றப்படும்பொழுது, வெப்ப அயனி உமிழ்வினால் எலக்ட்ரான்கள் உமிழப்படுகின்றன. *G* என்ற எலக்ட்ரான் பீச்சியில் (electron gun) உள்ள மின்னழுத்த வேறுபாட்டினால் எலக்ட்ரான்கள் முடுக்கம் பெற்று ஒரு மெல்லிய வரிக்கற்றையாக *G*-யிலிருந்து வெளியேறுகின்றன. இந்த எலக்ட்ரான் கற்றை *T* என்ற நிக்கல் இலக்கின்மீது செங்குத்தாக விழுகின்றது. இந்த இலக்கைப் படுகற்றையின் அச்சுக்கு இணையாக உள்ள ஓர் அச்சில் சுழற்றலாம். இயங்கவல்ல எலக்ட்ரான் சேமிப்புக்கலம் (இது ஃபாரடே நீள் உருளை என அழைக்கப்படுகிறது) இலக்கிற்கிணையான அச்சில் சுழலவல்லது. இதைக்

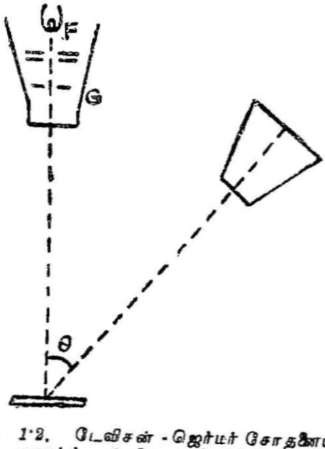
கொண்டு 20°-க்கும் 90°-க்கும் இடையில் சிதறலுறும் எல்லா எலக்ட்ரான்களையும் சேகரிக்க முடியும்.



படம் 1·1. டேவிசன் - ஜெர்மர் சோதனை

மோதலினால் தோன்றும் 'இரண்டாம் நிலை எலக்ட்ரான்கள்' எலக்ட்ரான் சேர்ப்பியில் நுழைவதில்லை. இக் கருவி முழுவதும் மூடப்பெற்று வெற்றிடமாக்கப்பட்டுள்ளது.

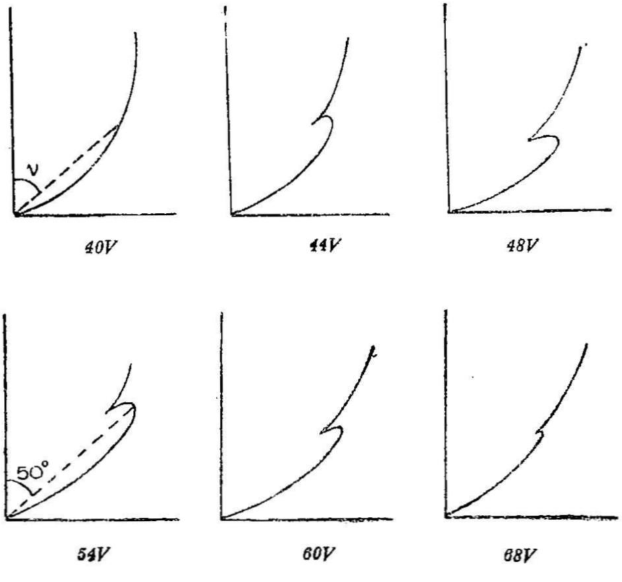
படிகத்தின்மீது எலக்ட்ரான் செங்குத்தாகப் படுவதால், அதன் மேற்புற அடுக்கு, ஒரு 'சமதளக் கீற்றணி' போன்று,



படம் 1·2. டேவிசன் - ஜெர்மர் சோதனையில் எலக்ட்ரான் பீச்சும், சேர்ப்பியும். இது படிகத்தின் (1, 1, 1) முகத்தில் நிகழ்கிறது.

எதிரொளிப்பினால் விளிம்பு விளைவினை விளைவிக்கின்றது. டேவிசனும் ஜெர்மரும் விளிம்பு விளைவால் ஏற்படும் எலக்ட்

ரான்களின் செறிவை வெவ்வேறு கோணங்களில் அளந்தனர். எலக்ட்ரான் சேமிப்புக் கலத்திலுள்ள மின்னோட்டமானியின் அளவிற்கும், படுகற்றை, சேமிப்புக்கலத்தில் நுழையும் எலக்ட்ரான் கற்றை ஆகியவற்றிற்கு இடையேயுள்ள கோணத்திற்குமான வரைபடம் வரையப்பட்டது.

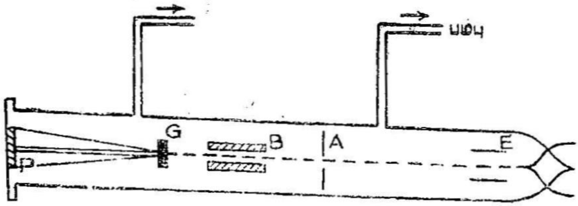


படம் 1·3. சிதறுகின்ற கற்றையின் செறிவிற்கும், கோணம் θ-விற்கும் இடையே வரையப்படும் வரைபடம்

இச் சோதனை பலமுடுக்கு மின் அழுத்தங்களுக்குச் செய்யப் பட்டுப் பல வரைபடங்கள் வரையப்பெற்றன. இவற்றுள் சில படம் 1·3-ல் காட்டப்பட்டுள்ளன. மின்னழுத்தம் 44 வோல்ட்டுகளாக இருக்கும்போது வெளிவரும் எலக்ட்ரான்களுக்கான வரைபடத்தில் ஒரு புடைப்பு (Bump) தென்படுகின்றது. இது மேல்நோக்கி நகர்ந்து 54 வோல்ட்டு மின் அழுத்தத்தில் 'பெருமநிலை' அடைகிறது. மின்னழுத்தம் இதற்கும் அதிகமானால், புடைப்பு குறைந்துகொண்டே வந்து சுமார் 68 வோல்ட்டில் முற்றிலும் மறைந்துவிடுகின்றது. மேற்கண்ட வரைபடத்தில் புடைப்பு ஏற்படுவது எலக்ட்ரான்கள் அலைகளாகத் திகழ்கின்றன என்பதற்கு ஓர் எடுத்துக்காட்டாகும்.

1·3. ஜி. பி. தாம்சனின் சோதனை (G. P. Thomson's Experiment)

டி பிராக்லி அலை-துகள் சமன்பாட்டின் உண்மையை மெய்ப்பிக்க 1928ஆம் ஆண்டு ஜி. பி. தாம்சன் என்ற ஆங்கிலேய விஞ்ஞானி ஒரு சோதனையை நிகழ்த்தினர்.

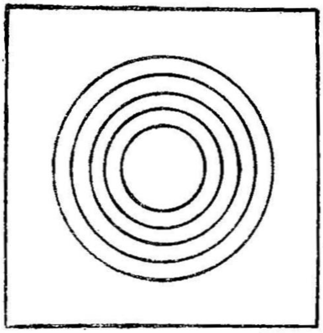


படம் 1·4. ஜி. பி. தாம்சனின் சோதனை

50,000 வோல்ட்டு மின் அழுத்தத்திற்கு உட்படுத்தப்பட்ட எதிர் மின்வாய்க் கற்றையொன்று, துளைகள் நிறைந்த *A* என்ற நேர் மின்வாய் வழியாகச் செலுத்தப்பட்டு, *B* என்ற உலோகத் தண்டிலுள்ள நுண்துளைக் குழாய் வழியாகச் சென்று, 10^{-6} செ.மீ. தடிமன் கொண்ட ஒரு பொன் தகட்டின்மீது விழுகிறது. விளிம்பு விளைவிற்குப் பிறகு எலக்ட்ரான்கள் *P* என்ற புகைப்படத் தகட்டின்மேல் பெறப்படுகின்றன. ஆய்கருவியின் எல்லாப் பாகங்களும் சுத்தமாக வெற்றிடமாக்கப்பட்டிருக்கும். புகைப்படத் தகட்டைக் கழுவி எடுத்தபோது படம் 1·5-ல் காட்டியதுபோல் பல, ஒரு மைய வளையங்கள் கிடைத்தன. இவ்வளையங்கள் ஒரு சிறு வட்டமான துளையில் ஏற்படும் விளிம்பு விளைவினல் கிடைக்கும் வளையங்களைப்போல் இருந்தன. இவ்வளையங்களின் ஆரங்கள் எலக்ட்ரான்களின் திசைவேகங்கள் அதிகரிக்க அதிகரிக்கக் குறைந்துகொண்டே வந்தன. அதாவது, 'எலக்ட்ரான்களின் திசை வேகங்கள் அதிகமாகின்றபோது அவற்றின் அலைநீளங்கள் குறைகின்றன' என்று கண்டுபிடிக்கப்பட்டது.

தாம்சனின் சோதனை பின்னர்ச் சிறிது மாற்றியமைக்கப்பட்டது. இதில் 'ஓர் எலக்ட்ரான் விளிம்பு விளைவு புகைப்படப் பெட்டி' பயன்படுத்தப்பட்டது. இது மிக மெல்லிய தகடுகளில், எலக்ட்ரான் விளிம்பு விளைவை ஊடுருவும் முறையில் (transmission) அறியவும், திட, திரவப் பொருள்களில் எதிரொளிப்பு முறையில் கண்டறியவும் பயன்படுத்தப்பட்டது. தனிம மூலக்

கூறுகளில் இந்த எலக்ட்ரான் விளிம்பு விளைவுகளை அறிய இன்னும் மாற்றியமைக்கப்பட்ட ஆய்கருவிகள் பயன்படுத்தப் பட்டன. தாம்சனேடு இணைந்து 'கிக்குச்சி' (Kikuchi) என்ற ஜப்பானிய விஞ்ஞானி இதே சோதனையை வெள்ளித் தகடுகள் கொண்டு, 36,000 வோல்ட்டு எலக்ட்ரான் கற்றைகளைப் பயன் படுத்திச் செய்தார்.



படம் 1·5.
ஜி. பி. தாம்சன் சோதனையில் கிடைத்த ஒருமைய வளையங்கள்

எலக்ட்ரான் விளிம்பு விளைவினால் கிடைக்கும் வளையங்களின் ஆரத்தையும், உலோகத்திற்கும் ஒளிப்படத் தகட்டிற்குமிடையே யுள்ள தொலைவையும் அளந்து அதனின்று வளைவுக்கோணம் θ-வின் மதிப்பைப் பெறலாம்.

உலோகத்தகட்டின் அணிக்கோவைத் தொலைவு (Lattice distance) '*d*' யை *X*-கதிர்ச் சிதறலின் மூலம் கண்டுபிடித்து அதனுதவியால் எலக்ட்ரானின் அலைநீளத்தைக் கணக்கிடலாம். இம் மதிப்பு டி பிராக்லி சமன்பாட்டிலிருந்து கிடைக்கும் மதிப்புடன் ஒப்பிடத்தக்க வகையில் உள்ளது.

1·4. எலக்ட்ரான் நுண்ணேக்கி (Election Microscope)

ஓர் 'ஒளி நுண்ணேக்கி'யின் பகுதிறன், அதில் பயன்படுத்தப் படும் ஒளியின் தன்மையைப் பொறுத்திருக்கிறது. கண்ணுறு ஒளியைக் கொண்டு நிறுவப்படுகின்ற நுண்ணேக்கி சுமார் 2500 *X* [இங்கு *X* என்பது பொருளின் பரிமாணத்தைக் குறிக்கும்] அளவிற்கே உருப்பெருக்கத்தைத் தரவல்லது. ஆனல் புற ஊதா (Ultra-Violet) ஒளியினைக் கொண்டு ஏறத்தாழ 6,000 *X* உருப் பெருக்கத்தைப் பெறலாம். ஆனல் ஓர் எலக்ட்ரான் நுண்ணேக்கி யைக் கொண்டு சுமார் 100,000 *X* வரை உருப்பெருக்கம் செய்ய முடியும். இதைப் பயன்படுத்திக் கிருமிகள், வைரஸ் (Virus), கூழ்கள் (Colloids) முதலியவற்றின் அமைப்பை நன்கு காண லாம். எனவே, எலக்ட்ரான் நுண்ணேக்கி மருத்துவம், தொழில், அறிவியல் ஆகிய துறைகளில் அடிப்படை ஆராய்ச்சிக்குப் பெரிதும் பயன்பட்டுவருகின்றது.

இரண்டு பொருள்களுக்கிடையில் உள்ள தொலேவு d

$$d = \frac{\lambda}{\mu \sin i} \quad \ldots \quad (1 \cdot 9)$$

என்ற சமன்பாட்டிற்கொப்ப இருந்தால், அப் பொருள்களைத் தனித்தனியாக நாம் நுண்ணோக்கியில் காணமுடியும். இந்தச் சமன்பாட்டில் λ என்பது பொருளைக் காணும்பொருட்டு அதனை ஒளிர்விக்கப் பயன்படுத்தப்படும் ஒளியின் அலைநீளத்தையும், $\mu \sin i$ என்பது 'பொருளருகு வில்லையின்' துளையையும் (aperture) குறிக்கும். [μ-பொருளருகு வில்லையின் ஒளி விலகல் எண்; i-பொருளருகு வில்லையை அடையும் ஒளிக்கூம்பின் செங்குத்துக் கோணம்.] இச் சமன்பாட்டிலிருந்து, நாம் ஒளியின் அலைநீளம் குறையக்குறைய, மிகச்சிறிய அளவு தொலைவுள்ள இரண்டு பொருள்களை நன்ருகக் காணக்கூடும். எனவே, குறைந்த அளவு அலைநீளங்கொண்ட ஒளியைப் பயன்படுத்தி நிறுவப்படும் நுண்ணோக்கியின் பகுதிறன் அதிகமாகும், இதனுல்தான் புற ஊதா ஒளியைப் பயன்படுத்தி அமைக்கப்படும் நுண்ணோக்கி, கண்ணுறு ஒளியைப் பயன்படுத்தி அமைக்கப்படும் நுண்ணோக்கியைக் காட்டிலும் அதிகப் பகுதிறன் கொண்டதாக இருக்கும். ஆகவே, அலைநீளம் மிகக் குறைவாகவுள்ள எலக்ட்ரான்கள், நுண்ணோக்கி அமைப்பதற்குப் பயன்படுத்தப்பட்டால், அந் நுண்ணோக்கி மிகுந்த அளவு பகுதிறன் உள்ளதாய் இருக்கும் என்பது ஐயமற விளங்குகிறது. V எலக்ட்ரான் வோல்ட்டு ஆற்றல் கொண்ட எலக்ட்ரான்களின் அலைநீளம்,

$$\lambda = \frac{12 \cdot 27}{\sqrt{V}} \text{ ஆ. அ.}$$ என்று நாம் முன்பே பார்த்தோம்.

இதிலிருந்து 10^4 எ. வோ. ஆற்றல்கொண்ட எலக்ட்ரான்கள் $0 \cdot 1227$ ஆ. அ. அலைநீளத்தைக் கொண்டிருக்குமென்று அறியலாம். இவ் வலை நீளம் கண்ணுறு ஒளியின் அலைநீளத்தைவிட ஏறத்தாழ 50,000 மடங்கு சிறிதாய் உள்ளது. எனவே, எலக்ட்ரான் கற்றை ஒன்றைப் பயன்படுத்தி அமைக்கப்படும் ஒரு நுண்ணோக்கி மிகுந்த அளவு பகுதிறன் உடையதாயிருக்கும் என்று அறியலாம்.

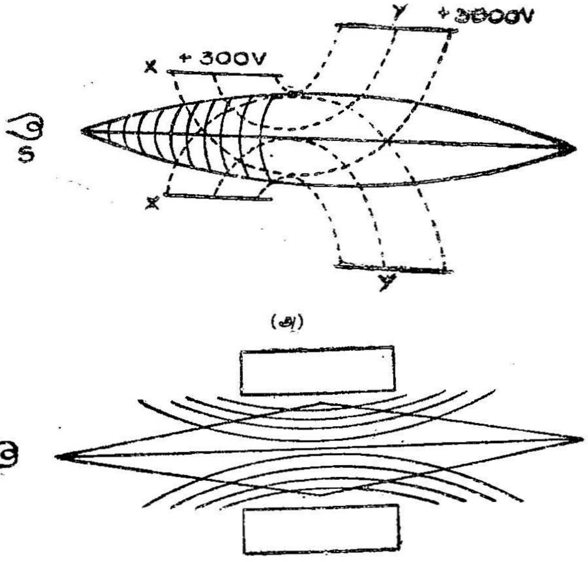
எலக்ட்ரான் வில்லை (Electron Lens)

செறிவு நிறைந்த ஓர் எதிர்மின்வாய்க் கற்றையை நிலைமின் புலம் அல்லது மின்காந்தப் புலத்தினுல் வளைத்து ஒரு புள்ளியில் குவிக்கலாம் என்பது நாம் அறிந்ததே. எவ்வாறு கண்ணுடி வில்லையானது ஒளிக்கற்றையொன்றைக் குவிக்கவோ அல்லது பரவலாக்கவோ பயன்படுத்தப்படுகிறதோ அவ்வாறு மின்புலம்,

காந்தப்புலம் இவற்றைப் பயன்படுத்தி ஓர் எலக்ட்ரான் கற்றையை ஒரு புள்ளியில் குவிக்கவோ பரவலாக்கவோ முடியும். இப் புலங்களை நாம் 'எலக்ட்ரான் வில்லைகள்' என அழைக்கலாம்.

நிலைமின் எலக்ட்ரான் வில்லை (Electrostatic Electron lens)

V நிலைமின் அலகு மின் அழுத்த வேறுபாடுள்ள இரண்டு புள்ளிகளுக்கிடையே எலக்ட்ரான் செல்லும்போது, அது முடுக்கம் பெற்று, ஓர் இயக்க ஆற்றலைப் பெறுகிறது.



(அ)

(ஆ)

படம் 1·6. எலக்ட்ரான் வில்லைகள்

(அ) ஈருருளை எலக்ட்ரான் வில்லை, (ஆ) மின்காந்த எலக்ட்ரான் வில்லை.

இதனைக் கீழ்க்கண்ட சமன்பாடு விளக்குகிறது.

$$eV = \frac{1}{2} mv^2 \text{ அல்லது,}$$

$$v = \sqrt{\frac{2\,Ve}{m}} \text{ செ.மீ./வினாடி.}$$

இதில் '*v*' என்பது எலக்ட்ரானின் திசைவேகத்தையும், '*e*', '*m*' என்பன முறையே அதன் மின்னூட்டம் (நிலைமின் அலகுகளில்), நிறை ஆகியவற்றையும் குறிக்கும்.

இயங்கிக்கொண்டிருக்கிற ஓர் எலக்ட்ரான், ஓர் மின்புலத்திலிருந்து மற்றொரு மின்புலத்திற்குச் செல்லும்போது அதன் திசைவேகம் மாறுவதோடல்லாமல், அதன் பாதையும் மாறுகிறது. இது, ஒளியானது ஓர் ஊடகத்திலிருந்து, மாறுபட்ட ஒளிவிலகல் எண் கொண்ட மற்றோர் ஊடகத்திற்குச் செல்வதுபோல் உள்ளது. மின்புலங்களைச் சரிசெய்வதன்மூலம் எலக்ட்ரான்களை ஒரு புள்ளியில் குவிக்கவோ அல்லது ஒரு புள்ளியினின்றும் விரிவடையவோ செய்யலாம். படம் 1.6-ல் ஓர் எலக்ட்ரான் கற்றை XX, YY என்ற இரண்டு மின்னழுத்த வேறுபாடுடைய (YY, XX-ஐ விட அதிக மின்னழுத்தம் உடையது) உருளைகளின் வழியாகச் செலுத்தப்படுகிறது. உருளைகளால் விளையும் மின்புலம் புள்ளியிட்ட கோடுகளால் காட்டப்பட்டுள்ளது. சம மின் அழுத்தக் கோடுகள் வளைந்து நேர் கோடுகளாகப் படத்தில் காட்டியதுபோல் இருக்கும். ஒரு சம மின்னழுத்தப் பரப்பின் வழியாகச் செல்லும் எலக்ட்ரான் அதற்குச் செங்குத்தாக வளைக்கப்படுமாதலின், XX, YY இவற்றின் மின்னழுத்தங்களைச் சரிசெய்து ஏதேனும் ஒரு புள்ளியில் எலக்ட்ரான் கற்றையைக் குவிக்கலாம். முதன் முதலில் 1932ஆம் ஆண்டு ப்ருச், ஜான்சன் ஆகியோர் இவ் வில்லையை நிறுவினர்.

மின்காந்த எலக்ட்ரான் வில்லை (Electro magnetic Electron lens)

சீரான காந்தப்புலத்தில், புலத்தின் திசைக்கு ஒரு குறிப்பிட்ட கோணத்தில் செல்லும் ஓர் எலக்ட்ரானின் பாதை ஒரு திருகு சுழலாக (Helix) அமையும் என்று காட்டலாம். 'எலக்ட்ரான் மூலம்' ஒன்றிலிருந்து வரிக்கற்றையாக வெளிவரும் எலக்ட்ரான்கள், ஒரு சீரான காந்தப்புலத்தினூடே செல்கின்றபோது ஒரு புள்ளியில் குவியும். இப் புள்ளிக்கும் எலக்ட்ரான் மூலத்திற்கும் இடையேயுள்ள தொலைவு, எலக்ட்ரானின் திருகு சுழல்பாதையின் புரியிடைத் தூரத்திற்குச் சமமாக இருக்கும். இவ்வாறு ஒரு காந்தப்புலம் வில்லையொன்றைப் போன்று செயல்படுகிறது எனலாம் (படம் 1.6 ஆ.). காந்தப்புல வலிமையை மாற்றுவதன் மூலம் குவிய தூரத்தையும் மாற்றிக்கொள்ளலாம். இது ஒளி வில்லைக்கு இல்லாத ஒரு சிறப்பு இயல்பாகும்.

நுண்ணோக்கியின் அமைப்பில் பயன்படுத்தப்பட்டுள்ள எலக்ட்ரான் வில்லைகளைப் பொறுத்து, எலக்ட்ரான் நுண்ணோக்கிகளை இரு வகைகளாகப் பிரிக்கலாம் :

(1) நிலைமின் எலக்ட்ரான் நுண்ணோக்கி.

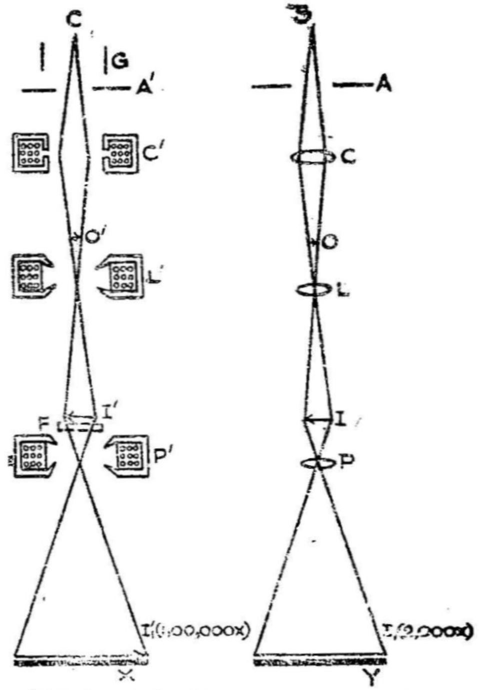
(2) காந்த எலக்ட்ரான் நுண்ணோக்கி.

மேலும் இவற்றை ஊடுருவும் வகையென்றும் (Transmission type), உமிழும் வகையென்றும் (Emission type) பிரிக்கலாம். இந் நுண்ணோக்கி முதன் முதலாக 1932ஆம் ஆண்டு ஜெர்மனியில் நால், ரங்கா என்பவர்களால் நிறுவப்பட்டது.

தற்போதைய எலக்ட்ரான் நுண்ணோக்கிகள், காந்த ஊடுருவும் வகையைச் சேர்ந்தவையாகும். அளவு, தோற்றம், விலை ஆகியவற்றில் எலக்ட்ரான் நுண்ணோக்கி, ஒளி நுண்ணோக்கியிலிருந்து மாறுபட்டபோதிலும், தத்துவம், செயல்படும் முறை ஆகியவற்றில் இரண்டும் ஒரே மாதிரியாக உள்ளன. உண்மையில் இது ஒளி நுண்ணோக்கியின் சரிநேர்ப் பகுதி (நகல்-Counterpart) எனில் மிகையாகாது.

வெண்மையாகச் சூடேற்றப்பட்ட cc என்ற டங்ஸ்டன் இழையிலிருந்து உமிழப்படும் எலக்ட்ரான் கற்றை ஓர் உயர் மின்னழுத்தத்தினுல் முடுக்கம் பெறுகிறது (50 kv – 300 kv). பிறகு இக் கற்றை ஒரு காந்த வில்லை வழியே சென்று, உருப் பெருக்கம் பெறவேண்டிய பொருளின்மீது விழுகின்றது. இப் பொருளால் சிதறுகின்ற எலக்ட்ரான்கள் காந்தப் பொருளருகு வில்லையினூடே ஊடுருவிச் சென்று பெருக்கமடைந்த முதல் பிம்பத்தை உண்டாக்குகிறது. இதன்பின் இக் கற்றை காந்தக் கண்ணருகு வில்லை வழியே செல்கின்றது. இதனுல் முதல் பிம்பத்தின் ஒருபகுதி பெருக்கமடைந்து, ஓர் ஒளிர்திரையின்மேல் விழுகிறது. ஒளிர் திரையின்மேல் இது ஏற்படுத்தும் ஒளிர்தலினுல் பிம்பத்தின் பகுதியை நாம் நேரடியாகப் பார்க்கலாம். ஒளிர் திரைக்குப் பதிலாக இக் கற்றையை ஒளிப்படத்தகடு ஒன்றின் மேல் விழும்படி செய்தால் பிம்பம் நிலையாகப் பதிவு செய்யப்படுகிறது. ஒளிர்திரையில் ஒரு தெளிவான பிம்பம் தெரியும்வரை காந்தப்புலங்களைச் சரிசெய்யலாம். இதுவே குவிமுகப்படுத்துதல் (Focussing) எனப்படுகின்றது.

எலக்ட்ரான் நுண்ணோக்கியில் ஒளிக்குப் பதிலாக எலக்ட்ரான்கள் பயன்படுத்தப்படுவதால் இக் கருவி ஒரு வெற்றிடத்தில் வேலை செய்யவேண்டிய தேவை ஏற்படுகிறது. எலக்ட்ரான் நுண்ணோக்கியின் உட்புறம் வெற்றிடமாக இல்லாவிட்டால் எலக்ட்ரான்கள் காற்றின் மூலக்கூறுகளோடு மோதிச் சிதறிவிடக் கூடும். எலக்ட்ரான் வில்லைகளின் உயர்ந்த 'குவிய ஆழம்' (Depth of focus), உருப்பெருக்கத்தை முப்பரிமாணத்தில் பெறுதற்குத் துணை செய்கிறது எனலாம்.



படம் 1·7. எலக்ட்ரான் நுண்ணோக்கி

C = எதிர் மின்வாய், எலக்ட்ரான்களின் மூலம்

G = கிரிட்

$A^{\prime}$ = நேர்மின்வாய்

$C^{\prime}$ = சுருக்கி மின்சுருள்

$L^{\prime}$ = கூழ்த் தட்டின் மேல் பொருள்

$I^{\prime}$ = இடைபிம்பம்

$F^{\prime}$ = கழற்றக்கூடிய ஒளிர் திரை

$I^{\prime}$ = இறுதி பிம்பம்

$P^{\prime}$ = பிம்பம் தோற்றுவிக்கும் மின்சுருள்

X = புகைப்படத் தகடு

ஒளி நுண்ணோக்கி

S = ஒளி மூலம்

A = ஒளி அடைப்பான்

C = சுருக்கி வில்லை

O = பொருள்

L = பொருளருகு வில்லை

I = இடை பிம்பம்

P = பிம்பம் தோற்றுவிக்கும் வில்லை

I_1 = இறுதிபிம்பம்

Y = திரை அல்லது புகைப்படத் தகடு

எலக்ட்,ரான் நுண்ணோக்கியின் பயன்கள்

எலக்ட்ரான் நுண்ணோக்கி மருத்துவம், தொழில், அறிவியல் ஆகிய பலதுறைகளில் அடிப்படை ஆராய்ச்சிகளில் பயன்படுத்தப் படுகின்றது. காகிதம், உலோகம், பிளாஸ்டிக் போன்ற

பொருள்களின் மேற்பரப்புகளின் பண்புகளை ஆய்ந்தறியவும், பாக்டீரியா, வைரஸ் போன்றவற்றின் கட்டமைப்பைக் கண்டறியவும் இந்த நுண்ணோக்கி பயன்படுகின்றது. நெசவு இழைகளின் கட்டமைப்பு, மசகு எண்ணெய் (Lubricating oil) தூய்மையாக்கல் ஆகியவற்றிற்கும் இந் நுண்ணோக்கி பயன்படுத்தப்படுகிறது.

குறைபாடுகள்:

எல்லாப் பொருள்களும் வெற்றிடத்தில் இருக்க வேண்டுமாகையால், பொருள்களை உலரவைப்பதிலும், காற்றை நீக்குவதிலும் அவற்றின் தன்மைகள் மாறிவிடக்கூடும். அதிகச் செறிவுடைய எலக்ட்ரான் கற்றைகள் அதிக நேரத்திற்குச் செயல்படும்போது அவை பொருள்களை அழித்துவிடக்கூடும். எலக்ட்ரான் கற்றை உலோகங்களை ஊடுருவிச்செல்லாது. எனவே உலோகங்களை ஆராய நேரடிமுறை பயன்படாது; 'நகல் எடுக்குமுறை'யினால்தான் (Photo copying) உலோகங்களின் தன்மையை ஆராய முடியும். எலக்ட்ரான் நுண்ணோக்கிக்கு இத்தகைய குறைபாடுகள் இருப்பினும் அதன் மிகுந்த பகுதிறன் காரணமாகவும், அதிகக் குவிய ஆழம் காரணமாகவும் இது ஒளி நுண்ணோக்கியைவிட அதிக அளவிற்குப் பயன்படுத்தப்படுகின்றது.

புரோட்டான்களின் நிறை, எலக்ட்ரான்களின் நிறையை விடச் சுமார் 2000 மடங்கு குறைவாக உள்ளதால், புரோட்டானின் டி பிராக்லி அலைநீளம், எலக்ட்ரானின் டி பிராக்லி அலை நீளத்தை விட அதே அளவில் குறைவாக உள்ளது. எனவே, புரோட்டான்களைப் பயன்படுத்தி நுண்ணோக்கிகள் அமைத்தால், அவை எலக்ட்ரான் நுண்ணோக்கிகளைவிட அதிகப் பகுதிறன் கொண்டவையாக இருக்கும். எனவே தற்போது அதிக உருப்பெருக்கம் கொடுக்கும் "புரோட்டான் நுண்ணோக்கிகளும்" அமைக்கப் பெற்று வருகின்றன.

1·5. ஐயப்பாட்டுக் கொள்கை அல்லது உறுதிப்பாடிலாமைக் கோட்பாடு (Uncertainty Principle)

1927ஆம் ஆண்டு ஹெய்சன் பெர்க் (Heisen berg) என்ற ஜெர்மன் இயற்பியல் வல்லுநர், இயற்பியலில் மிக முக்கியம் வாய்ந்த கோட்பாடுகளில் ஒன்றான "உறுதிப்பாடிலாமைக் கோட்பாடு" (Uncertainty Principle) என்ற ஒரு கோட்பாட்டைத் தந்தார். இது "ஐயப்பாட்டுக்கொள்கை" (Indeterminary

Principle) எனவும் அழைக்கப்படுகிறது. பொருள்களின் அலை - துகள் பண்பாட்டின் நேரடியான விளைவு இது என்று கூறுவது மிகையாகாது. பண்டைய எந்திரவியலின்படி, (Classical mechanics) இயக்கத்திலிருக்கும் ஒரு துகள், ஒரு குறிப்பிட்ட உந்தத்தோடு இயங்குகிறது எனவும், அத் துகளுக்கென ஒரு குறிப்பிட்ட 'இடம்' உண்டு எனவும் நாம் அறிவோம். அதாவது ஒரு பொருளின் 'நிலை'யை அறிவதற்குத் தேவையான 'உந்தம்,' 'இடம்' இரண்டையும் ஒருங்கே ஒருவித ஐயப்பாடுமின்றி அறியலாம். ஆனால் மூலக்கூறுகள், அணுக்கள், போன்ற சிறிய பொருள்களின் இயக்கத்தை நாம் அறிய முனைகிறபொழுது பண்டைய எந்திரவியலின் கொள்கைக்கு முரணாக, அவற்றின் உந்தம், உறைவிடம் ஆகியவற்றை ஒருங்கே அறியமுடியாது என்று தெரிகிறது.

ஆனால் 'குவான்டம் எந்திரவியலின்'படி (Quantum mechanics) ஒரு துகள் அதற்கே உரித்தான ஓர் 'அலைச்சார்' பினால் (wave function) விளக்கப்படுகின்றது. இந்த அலைச்சார் பினால் விவரிக்கப்படும் அலைப்பெட்டகந்தான் துகளை முற்றிலும் விவரிக்கின்றது எனலாம். மாக்ஸ் பார்ன் (Max Born) என்ற விஞ்ஞானியின் விளக்கப்படி, அலைப்பெட்டகம் பரவியுள்ள எந்த இடத்திலும் துகள் காணப்படலாம் என்று அறிகிறோம். இதிலிருந்து துகளின் உறைவிடத்தில் ஓர் ஐயப்பாடு உள்ளது எனவும் அறிகிறோம். அலைப்பெட்டகத்தில்தான் துகள் நிலவியிருக்குமென்றாலும் அது எந்த இடத்தில் இருக்கும் என்பதை உறுதியாகக் கூறமுடியாது. தவிர, துகளின் உந்தத்தையோ, திசைவேகத்தையோ நாம் சரிவரக் கணிக்கமுடியாது. அலைப்பெட்டகம் அநேக முகடுகள் கொண்ட ஒரு பெரிய பெட்டகமாக இருந்தால், திசைவேகப் பரவல் குறைவாக இருக்கும். எனவே, இங்குத் துகளின் திசை வேகத்தை ஓரளவிற்குத் துல்லியமாகக் கணிக்கலாம். ஆனால், அதன் உறைவிடத்தைத் துல்லியமாகக் கணிக்க முடியாது. மாறாக, துகள் பெட்டகத்தின் திசைவேகப் பரவல் அதிகமாக இருந்தால், அதன் உந்தம் அல்லது திசைவேகத்தை ஐயமற அறியமுடியாது. எனவே, ஓர் ஈறிலா அளவு பெரிய அலைப்பெட்டகத்தை எடுத்துக்கொண்டோமானால், துகளின் திசைவேகத்தை ஐயமற அறியலாம். ஆனால் அதன் உறைவிடத்தை ஐயமற அறியமுடியாது. மாறாக, மிகச் சிறிய அளவுகொண்ட பெட்டகத்தை எடுத்துக்கொண்டோமானால், துகளின் உறைவிடத்தை ஐயமின்றி அறியமுடியும். ஆனால் அதன் திசைவேகத்தை ஐயமின்றி அறியமுடியாது. அதாவது, ஒரே நேரத்தில், ஒரு துகளின் உந்தம், உறைவிடம் அல்லது திசைவேகம் இவற்றை ஐயப்பாடின்றி அறிய இயலாது. இதையே

ஹெய்சன் பெர்க்கின் "உறுதிப்பாடிலாமைக் கோட்பாடு" விளக்குகிறது.

"ஒரு துகளின் உறைவிடத்தை அறிதலிலுள்ள ஐயப்பாடு அல்லது உறுதிப்பாடிலாமை, அதன் உந்தத்தை அறிதலிலுள்ள உறுதிப்பாடிலாமை ஆகியவற்றின் பெருக்குத்தொகை ஏறத்தாழ $h/2\pi$ அளவிற்குச் சமமாக உள்ளது".

இதில் h என்பது பிளாங்கின் மாறிலி (Planck's Constant) நடைமுறையில் $h/2\pi$ என்பது $\hbar$ என்று எழுதப்படுகிறது.

உறைவிடத்தை அறிதலிலுள்ள உறுதிப்பாடிலாமையை 'Δq' என்றும், துகளின் உந்தப்பாட்டை அறிதலிலுள்ள ஐயப்பாட்டை 'Δp' என்றும் கொண்டால்,

$$\Delta p \cdot \Delta q \approx \hbar \qquad \ldots (1.10)$$

மேற்கண்ட சமன்பாட்டில் Δp-ன் மதிப்பு குறைவாக இருந்தால், Δq-ன் மதிப்பு அதிகமாக இருக்கும். மாறாக Δq-ன் மதிப்பு குறைவாக இருந்தால் Δp-ன் மதிப்பு அதிகமாக இருக்கும். இதைப்போலவே ஆற்றல் - நேரம், கோண உந்தம் - கோணப் பெயர்ச்சி ஆகியவற்றிற்கும் இத்தகைய "உறுதிப்பாடிலாமைக் கோட்பாடு" கொடுக்கப்படுகின்றது.

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar \qquad \ldots (1.11)$$

$$\Delta J \cdot \Delta \theta \approx \hbar \qquad \ldots (1.12)$$

சமன்பாடு (1.11)-ல் ΔE என்பது துகளின் ஆற்றலைக் கணிப்பதில் ஏற்படும் ஐயப்பாட்டையும், Δt என்பது அது கணிக்கப் படுகின்ற நேரத்திலுள்ள ஐயப்பாட்டையும் குறிக்கின்றன. அவ்வாறே சமன்பாடு (1.12)-ல் ΔJ என்பது துகளின் கோண உந்தத்தை அளப்பதில் ஏற்படும் ஐயப்பாடு என்றும், $\Delta\theta$ என்பது கோணப்பெயர்ச்சியை அளப்பதில் உள்ள ஐயப்பாடு என்றும் கொள்ளப்படுகின்றன. இக் கோட்பாட்டைக் கீழ்க்கண்டவாறு இன்னும் திட்டவட்டமாக வரையறுக்கலாம்.

"ஒரு துகளின் உறைவிடம், அதன் உந்தம் ஆகியவற்றை அளப்பதிலுள்ள ஐயப்பாடுகளின் பெருக்குத் தொகையானது $\hbar/2$-வின் மதிப்பைவிடக் குறைவாக இருக்கவே முடியாது"

இதையொட்டிச் சமன்பாடுகள் (1.10), (1.11), (1.12) ஆகியவற்றைக் கீழ்க்கண்டவாறு எழுதலாம்:

$$\Delta p \cdot \Delta q \geqslant \frac{\hbar}{2} \qquad \ldots (1.13)$$

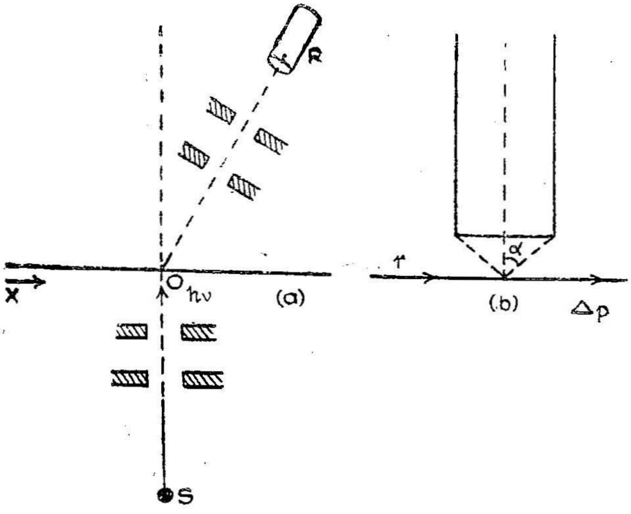
$$\Delta E \cdot \Delta t \geqslant \frac{\hbar}{2} \qquad \ldots (1.14)$$

$$\Delta J \cdot \Delta \theta \geqslant \frac{\hbar}{2} \qquad \ldots (1.15)$$

மேற்கண்ட சமனிலிகளில் (inequalities) $\hbar \to 0$ என்ற மதிப்பைச் சரியீடு செய்தால் அவை பண்டைய கொள்கைக்கு ஒப்ப அமையும் எனத் தெரிகின்றது.

ஹைஸன்பெர்க்கின் உறுதிப்பாடிலாமைக் கோட்பாட்டை விளக்கும் ஓர் எடுத்துக்காட்டு கீழே கொடுக்கப்படுகிறது.

அதிக அளவு பகுதிறன் கொண்ட ஒரு நுண்ணோக்கி கொண்டு ஓர் எலக்ட்ரானின் உறைவிடத்தைத் திட்டமாகக் கண்டுபிடிக்க முயலுவோம். 'ν' அதிர்வெண் கொண்ட γ-கதிர்களை எலக்ட்ரான்



படம் 1.8. γ-கதிர் நுண்ணோக்கியைக் கொண்டு எலக்ட்ரானின் உறைவிடத்தைக் காணல்.

மீது மோதச்செய்து, அதனை ஒரு "γ-கதிர் நுண்ணோக்கி" கொண்டு காண்பதாகக் கொள்வோம். இச் சோதனையை நடைமுறையில் நிகழ்த்த முடியாதாகையால் இதை ஹெய்சன் பெர்க்

ஓர் "எண்ணச் சோதனை" [Gadenken (thought) experiment] என்று கொண்டார். (படம் 1.8)-ல் ν அதிர்வெண் கொண்ட ஓர் ஒளிக்கற்றை SO என்ற கோட்டின் வழியாகஅனுப்பப்படுகின்றது. எலக்ட்ரான் X அச்சுச் திசையில்தான் இருக்கிறது எனக்கொண்டு, OR என்ற திசை வழியாய் எலக்ட்ரான் அங்கு உள்ளதா, இல்லையா எனக் காண்போம். ஒளிக்கூறு R என்ற நுண்ணோக்கியில் சிதறினால் எலக்ட்ரான் 'O'-க்கு வெகு அருகாமையில் இருக்க வேண்டும். நிரல்மானியிலிருந்து எலக்ட்ரானின் அதிர்வெண்ணைக் கணக்கிடலாம். மேலும் 'காம்ப்டான் விளைவு'ச் சமன்பாட்டினின்றும் எலக்ட்ரானின் உந்தத்தைக் கணிக்கலாம்.

ஒளிப் பகுப்பின் (Resolution) கீழ்வரம்பு, துகளைக் காணப் பயன்படுத்தப்படும் ஒளியின் அலை நீளத்தைப் பொருத்தது என நாம் அறிவோம். குறைந்த அலைநீளமுள்ள γ-கதிர்கள் எலக்ட்ரானைக் காணப் பயன்படுத்தப்பட்டால், காம்ப்டன் விளைவு ஏற்பட்டு எலக்ட்ரான் பின்னுதைத்துத் தள்ளப்படுகின்றது. எனவே எலக்ட்ரானின் உறைவிடத்தை நிறுவ முயலும்போது அதன் உந்தம் மாறுகின்றது. மேலும் இதனால் ஏற்படும் உந்தமாற்றம், மோதற் புள்ளியிலிருந்து சிதறிச்செல்லும் γ-கதிர்களின் திசைக் கேற்றவாறு மாறும்.

பண்டையக் கொள்கையின்படி, ஒரு நுண்ணோக்கியின் பகுதிறனைக் கீழ்க்கண்ட சமன்பாடு தருகின்றது.

$$\Delta x = \frac{\lambda}{\sin \alpha} \qquad \ldots \quad (1{\cdot}16)$$

இதில் Δx என்பது நுண்ணோக்கியில் பகுக்கப்பட்ட இரண்டு புள்ளிகளுக்கு இடையேயுள்ள தொலைவைக் குறிக்கிறது. இதிலிருந்து எலக்ட்ரான் உறைவிடத்தை அறிதலில் ஏற்படும் 'உறுதிப்பாடிலாமை'யைப் பெறலாம். λ என்பது நாம் பயன்படுத்தும் ஒளியின் அலை நீளம். 'α' என்பது நுண்ணோக்கியின் கோணத்துளை (angular aperture). ஒளியின் துகள் கோட்பாட்டின்படி மிகக்குறைந்த அளவு ஒளி, ஒரு 'குவான்டம்' அளவாவது இருக்கவேண்டும். அதாவது அதன் ஆற்றல் $h\nu$ ஆக இருக்கவேண்டும், எனவே எப்பொழுது எலட்ரான் இந்த '$h\nu$' என்ற 'ஆற்றல் கூறை' நுண்ணோக்கியில் சிதறச் செய்கிறதோ, அப்போதுதான் அது நுண்ணோக்கியில் காணப்படும். எனவே எலக்ட்ரானனது $h\nu/c$ என்ற உந்தத்தோடு பின்னுதைத்துத் தள்ளப்படுகிறது. சிதறல் குவாண்டத்தின் திசையைப் போலவே

இதன் திசையையும் அறிய முடியாது. துகளின் 'சிதறல் கூறு' α என்ற கோணத்தில் எங்காகிலும் நுண்ணோக்கியில் நுழையக் கூடும். எனவே சிதறல் கூறு, பின் உதைப்பு எலக்ட்ரான் ஆகியவற்றின் உறுதிப்பாடிலாமையை α கோணம் என எடுத்துக் கொள்வோம். எனவே எலக்ட்ரானின் உந்தம், நுண்ணோக்கியின் செங்குத்துத் திசையில் Δp அளவு உறுதிப் பாடிலாமையைக் கொண்டிருக்கும். அதாவது உந்தத்தில் உறுதிப்பாடிலாமை

$$\Delta p = \frac{h\nu}{c} \sin \alpha = \frac{h}{\lambda} \sin \alpha \qquad \ldots \quad (1.17)$$

[ஏனெனில் $\nu = c/\lambda$]

ஆகவே, இடம் உந்தம் ஆகியவற்றின் உறுதிப்பாடிலாமையின் பெருக்குத் தொகை

$$\Delta x \, \Delta p \cong \frac{\lambda}{\sin \alpha} \cdot \frac{h}{\lambda} \sin \alpha$$

$$\therefore \quad \Delta x \cdot \Delta p \sim h.$$

1·6 உறுதிப்பாடில்லாமைக் கோட்பாட்டின் விளைவுகள்

பண்டைய எந்திரவியலின்படி ஒரு துகளின் உறைவிடம், அதன் உந்தம் ஆகியவற்றை அறிய முடியும் என்றும், ஆனால் உறுதிப்பாடிலாமைக் கோட்பாட்டின்படி ஒரே சமயத்தில் ஒரு பொருளின் உறைவிடத்தையும், அதன் உந்தத்தையும் துல்லிய மாக அளக்க முடியாது என்றும் பார்த்தோம். எனவே, பண்டைய எந்திரவியலில் உறுதிப்பாடுடைய அளவீடுகள் எல்லாம், குவான்டம் எந்திரவியலில் 'நிகழ்திறன்' கணக்கீடுகளாக உள்ளன. ஆகையால், இந்தப் புதிய குவான்டம் எந்திர வியலின்படி 'துகள்' என்பது ஒருங்கே அலை (wave), 'நுண்ணிமம்' (corpuscle) ஆகியவற்றிலிருந்து பெறப்படுகின்றது என்று அறிய லாம். பண்டைய எந்திரவியலைக்கொண்டு விளக்க முடியாத பல உண்மைகளை, இந்த உறுதிப்பாடிலாமைக் கோட்பாடு கொண்டு விளக்கலாம். அவற்றுள் சிலவற்றை இங்குக் காண்போம்.

அணுக் கருவினுள் எலக்ட்ரான் இருக்க முடியாது.

அணுக் கரு ஒன்று ஏறத்தாழ 10^{-12} செ.மீ. ஆரமுடையது எனக் கண்டு பிடிக்கப்பட்டுள்ளது. எனவே இத்தகைய கருவில் எலக்ட்ரான் உள்ளடங்கி இருக்க வேண்டுமானால் அதன் உறை விடத்தைப் பொருத்த ஐயப்பாடு 10^{-12} செ.மீ.க்கு அதிகமாக இருக்க முடியாது. இப்போது உறுதிப்பாடிலாமைக் கோட்

பாட்டின்படி $\Delta p \cdot \Delta q \approx \hbar$. இதில் Δq என்பது எலக்ட்ரானின் உறைவிடத்தைப் பொருத்த உறுதிப் பாடிலாமையும் Δp என்பது அதன் உந்தத்தை தீர்மானிப்பதிலுள்ள உறுதிப்பாடிலாமையும் ஆகும்.

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}.$$

$$\therefore\ \Delta p = \frac{\hbar}{\Delta q} \approx \frac{6 \cdot 625 \times 10^{-27}}{2 \times 3 \cdot 14} \times \frac{1}{2 \times 10^{-13}}$$

$\approx 5 \cdot 275 \times 10^{-16}$ கிராம் செ.மீ/விநாடி.

இது எலக்ட்ரான் உந்தத்திலுள்ள ஐயப்பாடானுல், எலக்ட்ரான் உந்தத்தின் சிறும அளவாகவாவது இருக்கவேண்டும். அதாவது,

$p \approx 5 \cdot 275 \times 10^{-16}$ கிராம் செ.மீ.

நிறை 'm' கொண்ட எலக்ட்ரானின் இயக்கவாற்றலை கீழ்க் கண்டவாறு கண்டுபிடிக்கலாம்.

$$T = \frac{p^2}{2m} \approx \frac{(5 \cdot 275 \times 10^{-16})^2}{2 \times 9 \times 10^{-28}} \text{ ஏர்குகள்}$$

$[\because\ m = 9 \times 10^{-28}\ g]$

$$\approx \frac{(5 \cdot 275 \times 10^{-16})^2}{2 \times 9 \times 10^{-28}} \times \frac{1}{1 \cdot 6 \times 10^{-6}} \text{ எ. வோ.}$$

$[1 \cdot 6 \times 10^{-6}$ ஏர்கு $= 1$ மி. எ.வோ$]$

≈ 97 மி. எ. வோ.

ஆகவே, ஓர் அணுக்கருவில் இருக்கும் எலக்ட்ரான்கள் 97 மி. எ. வோ. ஆற்றலைப் பெற்றிருக்க வேண்டும் என்று அறியலாம். ஆனுல், சோதனைகளின்படி அணுவில் இருக்கும் ஓர் எலக்ட்ரான் கூட 4 மி.எ.வோ. இயக்க வாற்றலைவிட அதிகமாகப் பெற்றிருக்க முடியாதென்று அறிகிருேம். இதிலிருந்து அணுக்கருவில் எலக்ட்ரான்கள் தங்கி இருக்க முடியாதென்று அறியலாம்.

போரின் முதல் வட்டப் பாதையின் ஆரம்

அணுவின் முதல் வட்டப் பாதையில் உள்ள ஓர் எலக்ட்ரானின் உறைவிடம், உந்தம் இவற்றின் ஐயப்பாடுகள் முறையே Δq . Δp என்றிருக்குமானுல்,

$$\Delta q \,.\, \Delta p \approx \hbar. \quad \text{அல்லது} \quad \Delta p \approx \frac{\hbar}{\Delta q}$$

எலக்ட்ரானின் இயக்கவாற்றலிலுள்ள ஐயப்பாட்டைக் கீழ்க் கண்டவாறு எழுதலாம்.

$$\begin{aligned} \Delta T &= \tfrac{1}{2} m \, (\Delta V)^2 \\ &= \tfrac{1}{2} \frac{(m \, \Delta V)^2}{m} \\ &= \tfrac{1}{2} \frac{(\Delta p)^2}{m} \\ &\approx \frac{1}{2m} \left(\frac{\hbar}{\Delta q} \right)^2 \qquad \ldots \text{(i)} \end{aligned}$$

அதே எலக்ட்ரானின் நிலை ஆற்றலிலுள்ள ஐயப்பாடு

$$\Delta V \approx \frac{-Z e^2}{\Delta q} \qquad \ldots \text{(ii)}$$

எனவே எலக்ட்ரானின் மொத்த ஆற்றலிலுள்ள ஐயப்பாடு

$$\begin{aligned} \Delta E &= \Delta T + \Delta V \\ &\approx \frac{\hbar^2}{2m \, (\Delta q)^2} - \frac{Z e^2}{\Delta q} \qquad \ldots \text{(iii)} \end{aligned}$$

எலக்ட்ரானின் ஆற்றலிலுள்ள ஐயப்பாடு சிறுமமாக இருக்க வேண்டுமென்றால்,

$$\frac{d \, (\Delta E)}{d \, (\Delta q)} = O \quad \frac{d^2 \, (\Delta E)}{d \, (\Delta q)^2} = + Ve$$

ஆக இருத்தல் வேண்டும்.

$$\text{(i.e)} \quad \frac{d \, (\Delta E)}{d \, (\Delta q)} = \frac{-\hbar^2}{m \, (\Delta q)^3} + \frac{Ze^2}{(\Delta q)^2} \qquad \ldots \text{(iv)}$$

எனவே E சிறுமமாக இருப்பதற்கு

$$\frac{-\hbar^2}{m \, (\Delta q)^3} + \frac{Ze^2}{(\Delta q)^2} = 0$$

அல்லது $\dfrac{\hbar^2}{m \, (\Delta q)^3} \approx \dfrac{Ze^2}{(\Delta q)^2}$

அல்லது $\Delta q \approx \dfrac{\hbar^2}{mZe^2}$ ... (v)

மற்றும் சமன்பாடு (iv)-க்கு மீண்டும் தொகைகெழு காணில்,

$$\frac{d^2(\Delta E)}{d(\Delta q)^2} \approx + \frac{3\hbar^2}{m(\Delta q)^4} - 2\frac{Ze^2}{(\Delta q)^3}$$

$$\approx \frac{3\hbar^2}{m(\Delta q)^3\left(\frac{h^2}{mZe^2}\right)} - \frac{2Ze^2}{(\Delta q)^3}$$

$$\approx \frac{3Ze^2}{(\Delta q)^3} - \frac{2Ze^2}{(\Delta q)^3} \approx \frac{Ze^2}{(\Delta q)^3} = (+)\,ve$$

போர் (Bohr) கோட்பாட்டின்படி அணுவின் முதல் வட்டப் பாதையிலிருக்கும் எலக்ட்ரானின் ஆற்றல் ஒரு சிறுமமே. எனவே போரின் முதல் வட்டப் பாதையின் ஆரம்.

$$T = \Delta q = \frac{\hbar^2}{mZe^2} = \frac{h^2}{4\pi^2 mZe^2}$$

இது நாம் வேறுமுறையில் தருவிக்கும் போர் முதல் வட்டப் பாதையின் ஆரத்திற்குச் சமமாக இருப்பது இங்குக் குறிப்பிடத் தக்கது.

ஓர் அணு செயலூக்கம் பெறும்போது, கதிர்வீச்சு ஏற்படுகிறது என்பதைக் காணல் :

ஓர் அணுச் செயலூக்கத்தின் தோற்றத்திற்கும், அதன் பொருட்டு ஏற்படுகின்ற கதிர் வீச்சுக்கும் இடையேயுள்ள கால இடைவெளி 10^{-18} வினடி ஆகும். இதைக் கால அளவீட்டிலுள்ள உறுதிப் பாடிலாமையாகக் கொண்டால்,

$\Delta t = 10^{-18}$ வினடி என ஆகும்.

$\Delta E\,\Delta t = \frac{h}{2\pi}$ என்ற சமன்பாட்டின்படி

$$\Delta E = \frac{h}{2\pi.\Delta t} = \frac{6{\cdot}625 \times 10^{-34}}{2\times\pi\times 10^{-8}}$$

$$= 1{\cdot}1 \times 10^{-20} \text{ ஜூல்கள்}$$

ஆனல் $E = h\nu$ என்பது நமக்குத் தெரியும்.

எனவே $\Delta E = h \cdot \Delta \nu$.

$$\therefore \quad \Delta \nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{1 \cdot 1 \times 10^{-26}}{6 \cdot 625 \times 10^{-34}}$$

$$= 16 \cdot 6 \times 10^{6}$$

$= 16 \cdot 6$ மெகா ஹெர்ட்ஸ்கள்

இதுவே உமிழ்வு முறையில் அளவிடப்பட்ட பெரும அதிர் வெண்ணைக இருப்பதால், அணுச் செயலூக்கம் அடைகின்ற பொழுது கதிர்வீச்சு ஏற்படுகின்றது என்று அறியலாம்.

1·7. பருப்பொருள் அலைகள் உண்டு என்பதற்கான சான்றுகள்

எலக்ட்ரான்கள் அலைகளைப் போன்று செயல்படுகின்றன என்ற உண்மையினை டேவிசன், ஜெர்மர், ஜி. பி. தாம்சன் ஆகியவர்களின் சோதனைகள் நன்கு விளக்குகின்றன எனக் கண்டோம். எவ்வாறு இரட்டைப் பட்டகத்தைக் கொண்டு ஒளியில் குறுக்கீட்டு விளைவை உண்டாக்கி, திரையில் வரிப் பட்டைகளை உண்டாக்கலாமோ, அவ்வாறே எலக்ட்ரான்களைக் கொண்டும் குறுக்கீட்டு விளைவுகளை நிகழச்செய்து வரிப்பட்டை களைத் தோற்றுவிக்க முடியும்.

மேற்கண்ட சோதனைகள் எலக்ட்ரான்களைக் கொண்டே நிகழ்த்தப்பட்டன. ஆனல் இதே சோதனைகளை மற்றத் துகள் களைக் கொண்டும் நிகழ்த்தமுடியும். காட்டாக, 1932ஆம் ஆண்டு, ஸ்டெர்ன் (Stern) என்ற ஜெர்மன் விஞ்ஞானி, படிகப்பரப்புகளின் வழியாகச் செல்லும் அணுக்கற்றைகளும், மூலக்கூறு கற்றைகளும் விளிம்பு விளைவுக்கு உட்படுகின்றன என்பதைச் சோதனை மூலம் கண்டறிந்தார். இவ் விளிம்பு விளைவு எலக்ட்ரான் விளிம்பு விளைவு போன்று இருந்தது என்றும் அவர் கண்டார். ஹீலியம் அணுக்கள் போன்ற மின்னூட்டமற்ற துகள்களும், படிகங்களில் X - கதிர்கள் அடைகின்ற விளிம்பு விளைவுகளைப் போன்ற விளிம்பு விளைவுகளை அடைகின்றன என்பதனையும் அவர் கண்டுபிடித்தார். இச் சோதனைகளின் மூலம் நாம் கீழ்க்கண்ட முடிவுகளைப் பெறலாம்.

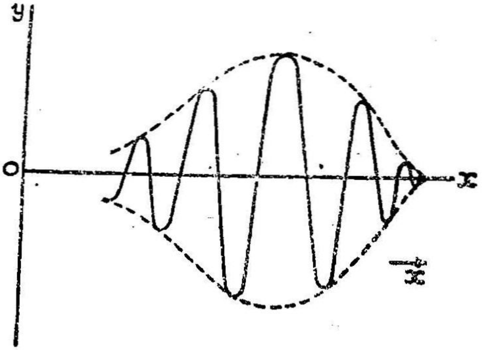
1. எல்லாப் பொருள்-துகள்களும் அலைகள்போன்று செயல் படுகின்றன.

2. ஏதாவதொரு துகளுக்கான அலைகளின் அலைநீளங்கள் $\lambda = h/mv$ என்ற டி பிராக்லியின் சமன்பாட்டினல் கொடுக்கப்படுகின்றன.

1·8. பொருளின் அலைக்கொள்கைக்கும், துகள் கொள்கைக்குமுள்ள வேறுபாடும், அதன் நீக்கமும்,

பொருளானது, அலையாகவும் துகளாகவும் திகழ்கின்றது என்பதற்குப் போதிய சான்றுகள் உள்ளன. சில நேரங்களில் அது துகளாகவும், சில நேரங்களில் அது அலையாகவும் திகழ்கின்றது. பொருளின் இத்தகைய வேறுபட்ட இரு பண்புகளை எவ்வாறு விளக்குவது என்ற வினா எழுவது இயற்கையே.

முதன்முதலாகப் பொருள்களின் இருவகைப் பண்புகளை, ஷ்ரோடிஞ்சர் (Shrodinger) என்ற ஜெர்மானிய விஞ்ஞானிதான் விளக்க முயன்றார். இவர் எலக்ட்ரான் போன்ற துகள்களை 'அலைக்கட்டுகள்' (wave packets) என்று கருதினர். ஒரு அலைக்கட்டில், மிகச்சிறிய அளவு வேறுபாடு கொண்ட திசைவேகங்களும் அலைநீளங்களும் கொண்ட அலைக்குழுக்கள் உள்ளன; இவ் வலைக் குழுக்களின் கட்ட வேறுபாடுகள், துகள் எந்த இடத்தில் காணப்படுகிறதோ அந்த இடத்தில் சேர்க்கைக் குறுக்கீட்டு விளைவு (cumulative interference) அடைகின்ற வண்ணம் அமைகின்றன என்றும், துகள் இல்லாத இடங்களில் அழிவுக் குறுக்கீட்டு விளைவு (destructive interference) அடைகிற



படம் 1.9. ஒரே பரிமாணமுள்ள அலைக்குழுவின் அலைவீச்சு.

தென்றும் கொண்டார். பொதுவாக ஒரே பரிமாணம் கொண்ட அலைக்குழுவின் அலைவீச்சு படம் (*1.9*)-ல் காட்டப்பட்டிருக்கிறது. இத்தகைய அலைக்குழு '*G*' என்ற தனக்கே உரித்தான திசை வேகத்தோடு இயங்கிறது. இத் திசைவேகத்தைத் 'குழுத் திசைவேகம்' (Group Velocity) என்று அழைக்கலாம், அலைக் குழுவிலுள்ள ஒவ்வோர் அலையும் ஒரு சராசரி திசைவேகத்தைக்

கொண்டிருக்கிறது. இத் திசைவேகம் "கட்டத்திசை வேகம்" (phase velocity) என்று அழைக்கப்படுகிறது. பொருள்கள் இயங்குகின்ற திசைவேகம் 'v', அலைக்குழுவின் குழுத்திசை வேகத்திற்குச் சமமாக இருக்கும் என்று மெய்ப்பிக்கலாம்.

அதிர்வெண்ணிலும், கட்டத்திலும் சிறிய வேறுபாடு கொண்ட, ஆனால் ஒரே அலைவீச்சுக் கொண்ட இரண்டு அலைத்தொடர்களை எடுத்துக்கொள்வோம். இவற்றை முறையே

$$E_1 = A \cos \omega_1 \left(t - \frac{x}{u_1}\right) \quad \ldots (1.18)$$

$$E_2 = A \cos \omega_2 \left(t - \frac{x}{u_2}\right) \quad \ldots (1.19)$$

என்று எழுதலாம். இந்த இரண்டு அலைகளின் தொகுபயன் அலைவீச்சை மேற்கண்ட சமன்பாடுகள் இரண்டையும் கூட்டிப் பெறலாம். எனவே,

$$E = E_1 + E_2$$

$$= A \cos \omega_1 \left(t - \frac{x}{u_1}\right) + A \cos \omega_2 \left(t - \frac{x}{u_2}\right)$$

$$= 2A \cos \left\{\frac{\omega_1}{2}\left(t - \frac{x}{u_1}\right) + \frac{\omega_2}{2}\left(t - \frac{x}{u_2}\right)\right\} \times$$

$$\cos \left\{\frac{\omega_1}{2}\left(t - \frac{x}{u_1}\right) - \frac{\omega_2}{2}\left(t - \frac{x}{u_2}\right)\right\} \quad \ldots (1.20)$$

இப்பொழுது, $\omega_1 = \omega = 2\pi \nu$ ... (1.21)

என்றும்

$$\omega_2 = \omega + d\omega = 2\pi (\nu + d\nu) \quad \ldots (1.22)$$

என்றும் கொண்டால்,

$$\omega_2 - \omega_1 = d\omega. \quad \ldots (1.23)$$

$$\omega_2 + \omega_1 = 2\omega \quad \ldots (1.24)$$

என்பன கிடைக்கும்.

[இங்கு $d\omega << \omega$
எனவே $d\omega$ ஒதுக்கப்பட்டது.]

அவ்வாறே,

$$\frac{\omega_1}{u_1} + \frac{\omega_2}{u_2} = \frac{2\omega}{u} \quad \ldots (1.25)$$

என்று எழுதலாம்.

இதில் $u = \frac{u_1 + u_2}{2}$ ஆகும்.

எனவே சமன்பாடு

$$E = 2A \cos \omega\left(t - \frac{x}{u}\right) \cos\left[- \frac{d\omega}{2} + \frac{1}{2}\left(\frac{\omega_2}{u_2} - \frac{\omega_1}{u_1}\right) x \right]$$

என ஆகிறது.

இப்பொழுது $\frac{\omega_2}{u_2} - \frac{\omega_1}{u_1} = d\left(\frac{\omega}{u}\right)$

என்று எழுதினால்,

$$E = 2A \cos \frac{d\omega}{2}\left[t - \frac{d\left(\frac{\omega}{u}\right)}{d\omega} \text{'}x\text{'} \right] \cos \omega\left(t - \frac{x}{u}\right) \quad \dots (1.26)$$

என்பது கிடைக்கிறது.

மேற்கண்ட சமன்பாடு u என்ற கட்டத்திசை வேகத்தையும் $2A \cos \frac{d\omega}{2}\left(t - \frac{\text{'}x\text{'}}{G}\right)$ என்ற அலைவீளத்தையுங் கொண்ட ஓர் அலையைக் குறிக்கிறது.

இந்தச் சமன்பாட்டில்

$$G = \frac{d\omega}{d\left(\frac{\omega}{u}\right)} = \frac{d\nu}{d\left(\frac{\nu}{u}\right)}$$

அல்லது $$\frac{1}{G} = \frac{d\left(\frac{\nu}{u}\right)}{d\nu} \quad \dots (1.27)$$

சமன்பாடு (1.27) விவரிக்கும் அலை, X-அச்சுத்திசையில் G திசைவேகத்தில் பரவுதலைக் குறிக்கின்றது. அலையின் திசை வேகம், சைகையின் (Signal) திசைவேகத்தைக் குறிப்பதால், இது குழுத்திசை வேகத்தைக் கொடுக்கும் சமன்பாடு (1.27)ஐ,

$$\frac{1}{G} = \frac{d\,(1/\lambda)}{d\nu} \quad \dots (1.27\text{ அ})$$

என்று எழுதலாம்.

$$\left(\lambda = \frac{u}{\nu}\right)$$

E, V என்பன முறையே துகளின் நிலையாற்றல்களைக் குறித்தால்,

$$\frac{1}{2} mv^2 = E - V. \quad \ldots \quad (1.28)$$

இங்கு 'm' என்பது துகளின் நிறையையும், 'v' என்பது துகளின் திசைவேகத்தையும் குறிக்கும்.

அல்லது $$v = \left[\frac{2(E-V)}{m}\right]^{\frac{1}{2}}. \quad \ldots \quad (1.29)$$

$\lambda = \frac{h}{mv}$ என்ற டி பிராக்லியின் சமன்பாட்டைப் பயன்படுத்தினால்

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{mv}{h} = \frac{m}{h}\left\{\frac{2(E-V)}{m}\right\}^{\frac{1}{2}} \quad \ldots \quad (1.30)$$

என்பது கிடைக்கும்.

இதைச் சமன்பாடு (1.27அ)-ல் சரியீடு செய்தால் நமக்குக் குழுத்திசை வேகம் (Group velocity) கிடைக்கும்.

$$\frac{1}{G} = \frac{d}{d\nu}\left[\frac{m}{h}\left\{\frac{2(E-V)}{m}\right\}^{\frac{1}{2}}\right]$$

$$= \frac{d}{d\nu}\left[\frac{m}{h}\left\{\frac{2(h\nu - v)}{m}\right\}^{\frac{1}{2}}\right] \quad [\text{ஏனெனில் } m = h\nu]$$

$$= \frac{1}{h}\frac{d}{d\nu}\left[\left\{2m(h\nu - v)\right\}^{\frac{1}{2}}\right]$$

$$= \frac{1}{h}\cdot\frac{1}{2}\left\{2m(h\nu - v)\right\}^{-\frac{1}{2}} 2mh$$

$$= \frac{m}{[2m(E-V)]^{\frac{1}{2}}} = \left[\frac{m}{2(E-V)}\right]^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{v}$$

எனவே, குழுத்திசை வேகம் G = துகளின் திசைவேகம் u.

மேற்கண்ட கொள்கைகளிலிருந்து இயங்கிக்கொண்டிருக்கும் பொருள்துகள் ஓர் அலைக்குழுவிற்குச் சமானமானதென்று அறிகிறோம். இதனை 'அலைப்பெட்டகம்' (Ware-packet) என்றும் அழைக்கலாம். ஆனால், ஒருதுகளை ஓர் அலைப்பெட்டகத்தோடு ஒப்பிடுவதில், ஒரு பெரிய இடர்ப்பாடு உள்ளது. அலைப்பெட்டகமானது விரைவில் அழிந்துவிடக் கூடியது. காட்டாக, நீர்மட்டத்தின்மேல் ஓர் அலை முகட்டை நாம் உண்டாக்கினால், அது வெகு விரைவில் உருக்குலைந்துவிடுகின்றது. ஆனால் துகள் விரைவில் அழியும் தன்மை வாய்ந்தது அன்று. எனவே, துகள் ஒன்றை

அலைப்பெட்டகமாகக் கருதவேண்டுமானால், அதற்குரிய 'வழிகாட்டி அலை' (Guiding wave) ஒன்று இருக்கவேண்டுமென்று ஏற்படுகின்றது. இந்த 'வழிகாட்டி அலை'யை ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாடு விளக்குகிறது. இந்த வழிகாட்டி அலையின் உதவியின்றி அலைப் பெட்டகக்கொள்கை நிலைத்து நிற்காது. ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாடு, இவ் வழிகாட்டி அலையின் அலைவீச்சை ஒரு புள்ளியில் பருப்பொருள் துகள் இருப்பதற்கான நிகழ்திறனுடன் இணைக்கிறது. ஒரு புள்ளியில் இந்த வழிகாட்டி அலையின் அலைவீச்சு சுழியாக இருப்பின், அந்தப் புள்ளியில் துகள் இருப்பதற்கான நிகழ்திறனும் சுழியாகிவிடும். அலைப் பெட்டகத்திற்கு அப்பாற்பட்ட புள்ளிகளில் இவ் வழிகாட்டி அலையின் அலைவீச்சு மிகச் சிறியதாக உள்ளதால், துகள் இருப்பதற்கான நிகழ்திறனும் சிறிய அளவினதாக இருக்கும். ஆனால், அலைப்பெட்டகத்தில் துகள் இருப்பதாற்கான நிகழ்திறன் பெருமமாக இருக்கும். 'v' குழுத்திசை வேகம் கொண்ட, அலைப் பெட்டகம் காணப்படும் இடத்தில் ,துகள் ஒன்று காணப்படும் என்று அறியலாம். வேறுமுறையாகக் கூறினால், அலைப் பெட்டகத்தோடு 'வழிகாட்டி அலை'யையும் சேர்த்தால், 'v' திசை வேகத்தோடு இயங்கும் ஒருதுகள் கிடைக்கின்றது. இவ் வழிகாட்டி அலை, குறுக்கீட்டு விளைவு, விளிம்பு விளைவு முதலிய நிகழ்ச்சிகளுக்குள்ளாகும் தன்மை வாய்ந்தது எனலாம்.

ஒரு பொருளின் துகள், அலை ஆகிய பண்புகள் ஒன்றுக்கொன்று 'நிரப்புந்தன்மை' (Complimentary) வாய்ந்தவை. பருப்பொருள் துகளொன்று ஒரே நேரத்தில் துகளாகவும் அலையாகவும் இருக்கமுடியாது. துகள் பண்பைக் காண ஒரு சோதனை நிகழ்த்தினோமானால். அதன் அலைப்பண்பு மறைந்து விடுகின்றது. அதைப்போலவே அலைப்பண்பை ஒட்டியசோதனையொன்றில் துகள் பண்பு மறைந்துவிடுகிறது. பருப்பொருளின் அலை - துகள் பண்புகளின் ஒருமைப்பாடு கீழே கொடுக்கப்பட்டுள்ளது.

எண்	துகள் பண்பு	அலைப்பண்பு
1.	உந்தம்	அலைநீளம்
2.	ஆற்றல்	அதிர்வெண்

அலை-துகள் ஆகியவற்றை $= \lambda \frac{h}{mv}$ என்ற டி பிராக்லி சமன்பாடுதான் இணைக்கிறது எனலாம்.

1·9. பருப்பொருள் அலையின் இயக்கத்திற்கான சமன்பாடு, நேரச் சார்பற்ற ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாடு (Time Independent Schrodinger Equation)

துகள் ஒன்றைச் சார்ந்த 'நிலை அதிர்வு அலைக்குழு' ஒன்றை எடுத்துக்கொள்வோம். அதன் ஆயக்கூறுகள் x, y, z என இருக்கட்டும். Ψ என்பது அதைச்சார்ந்த டி பிராக்லி அலைகளின் t-நேரத்திலுள்ள இடமாற்றம் (displacement) என்று கொள்வோம். பழமைக் கொள்கைப்படி அலை இயக்கத்திற்கான மூன்று பரிமான வகைகெழுச் சமன்பாட்டை (Three dimensional differential Equation).

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \quad \ldots \quad (1.31)$$

என எழுதலாம். இதில் u என்பது அலையின் திசை வேகத்தை குறிக்கிறது. சமன்பாடு (1.31)-ன் ஒரு பொதுத்தீர்வை

$$\Psi(x, y, z, t) = \Psi_0(x, y, z)\, e^{-i\omega t} \quad \ldots \quad (1.32)$$

என்று எழுதலாம். இதில் Ψ_0 என்பது எடுத்துக்கொள்ளப்பட்ட புள்ளியில் உள்ள அலையின் அலைவீச்சு ஆகும். x, y, z என்ற ஆயக் கூறுகளுக்குப் பதிலாக $\vec{\gamma}$ என்ற வெக்டரைச் சரியீடு செயதால் $\Psi(\vec{\gamma}\, t) = \Psi_0(\vec{\gamma})\, e^{-i\omega t}$ ... (1.33)

என்று கிடைக்கும். இந்தச் சமன்பாட்டை, t-யைப் பொருத்து இரண்டு முறை வகைகெழு காணில்

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = -\omega^2\, \Psi_0(\vec{\gamma})\, e^{-i\omega t} = -\omega^2\, \Psi \quad \ldots \quad (1.34)$$

என்பது கிடைக்கும். இதனைச் சமன்பாடு (1.31)-ல் சரியீடு செய்தால்,

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = \frac{-\omega^2}{u^2}\Psi \quad \ldots \quad (1.35)$$

என்பது கிடைக்கும்.

ஆனல் $\omega = 2\pi\nu = 2u\pi/\lambda$.

அதாவது $\dfrac{\omega}{u} = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ ... (1.36)

தவிரவும், $\dfrac{\partial^2 \Psi}{\partial x2} + \dfrac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \dfrac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = \Delta^2 \Psi$ ... (1.37)

இதில் Δ^2 என்பது லாப்லாசியன் செயலி (Laplacian operator) (*1.36*), (*1.37*) சமன்பாடுகளைப் பயன்படுத்தினால்,

சமன்பாடு (*1.35*)ஐ $\nabla^2 \Psi + \frac{4\pi^2}{\lambda^2}\Psi = 0$ ... (*1.38*)

என்று எழுதாம்.

இதுவரைக் குவான்டம் கொள்கையை நாம் எங்கும் புகுத்தவில்லை. இப்பொழுது குவான்டம் கொள்கையின்படி $\lambda = h/mv$ என்பதைச் சமன்பாடு (*1.38*)-ல் சரியீடு செய்தால்,

$$\nabla^2 \Psi + \frac{4\pi^2 m^2 v^2}{h^2}\Psi = 0 \quad \ldots (1.39)$$

என்ற சமன்பாடு கிடைக்கும்.

இப்பொழுது E, V. முறையே துகளின் மொத்த ஆற்றல், நிலையாற்றல் என்று கொண்டால் இயக்கவாற்றலை $\frac{1}{2}mv^2 = E-V$ என்ற சமன்பாட்டிலிருந்து பெறலாம். எனவே $m^2 v^2 = 2m(E-V)$. இதைச் சமன்பாடு (*1.39*)-ல் சரியீடு செய்தால்

$$\nabla^2 \Psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E-V)\Psi = 0 \quad \ldots (1.40)$$

என்ற சமன்பாடு கிடைக்கிறது.

இச் சமன்பாடு 'ஷ்ரோடிஞ்சரின் நேர்சார்பற்ற அலைச் சமன்பாடு' (Schrodinger's time independent wave equation) என்றழைக்கப்படுகின்றது. இதில் Ψ என்பது 'அலைச்சார்பு' எனப்படும். இப்பொழுது

$$\hbar = h/2\pi \quad \ldots (1.41)$$

என்ற மதிப்பைச் சமன்பாடு (*1.40*)-ல் புகுத்தினோமானால் நடைமுறையில் பயன்படுத்தப்படுகிற

$$\nabla^2 \Psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E-V)\Psi = 0 \quad \ldots (1.42)$$

என்ற ஷ்ரோடிஞ்சரின் அலைச்சமன்பாடு கிடைக்கிறது. இந்தச் சமன்பாட்டைக் கீழ்க்கண்ட குவான்டம் எந்திரவியலின் எடுகோள்களிலிருந்தும் தருவிக்கலாம்.

1·10. குவான்டம் எந்திரவியலின் எடுகோள்கள்

விஞ்ஞானத்தில் பயன்படுத்தப்படும் எடுகோள்களில் இரண்டு வகையுண்டு. முதல்வகை எடுகோள்கள் நேரடியாக நாம் கண்ணுறும் உண்மையை விளக்குவன. வெப்ப எந்திரவியலின் இரண்டாவது விதி பின்வருமாறு வரையறுக்கப்பட்டால்,

அஃது இவ் வகை எடுகோள்களுக்கு எடுத்துக் காட்டாய் விளங்கும். 'சூடான பொருள்களிலிருந்து வெப்பமானது தற்செயலாகக் குளிர்ந்த பொருள்களுக்குச் செல்கிறது.' இரண்டாம் வகை எடுகோள்களின் பொருள் நமக்கு நேரடியாகப் புலப்படாது. எடுகோள்களிலிருந்து பொருளை யூகித்துத்தான் அறிந்துகொள்ள முடியும். இதற்கு எடுத்துக்காட்டாக மேற்கண்ட விதியின் மற்றொரு வரையறுத்தலைக் கூறலாம்.

"தற்செயல் நிகழ்ச்சி ஒன்றில் என்ட்ரோபி (entropy) மிகுதியாகிறது."

குவான்டம் எந்திரவியலின் எடுகோள்கள் இரண்டாம் வகையைச் சேர்ந்தவை. அவற்றின் உட்பொருளை நாம் யூகஞ் செய்துதான் அறிந்துகொள்ள முடியும். குவான்டம் எந்திரவியலின் எடுகோள்களை இங்கு நாம் காண்போம்.

(அ) முதலாவது எடுகோள் :

"ஒரு குவான்டம் தொகுப்பின் நிலையை, அத் தொகுப்பின் அலைச்சார்பான $\Psi(\vec{r_1}, \vec{r_2}, \ldots t)$ விளக்குகிறது"

இந்த எடுகோளில் $\vec{r_1}$, $\vec{r_2}$ என்பவை அந்தத் தொகுப்பிலுள்ள 1, 2,... என்ற துகள்களின் இடத்தைச் சுட்டுகின்ற ஆயங்களைக் குறிக்கின்றன. t என்பது நிலையின் நேரத்தைக் குறிக்கின்றது. சோதனைகள் மூலம் பெறக்கூடிய எல்லாப் பண்புகளையும் Ψ என்ற அலைச்சார்பு விளக்க வல்லது. Ψ என்ற அலைச்சார்பிற்குத் தீர்வு கண்டால்தான் முதலாவது எடுகோளின் முக்கியத்துவம் விளங்கும். இந்த அலைச்சார்பை விவரிக்க, 'குவான்டம் எண்கள்' என்ற ஓர் எண்குழு பயன்படுத்தப்படுகின்றது. [Ψ சிக்கல் எண்ணுகவோ அல்லது மெய் எண்ணுகவோ (Complex number or real number) இருக்கலாம்].

(ஆ) இரண்டாவது எடுகோள் :

"'n'ஐக் குவான்டம் எண்ணுக உடைய ஒரு குவான்டம் தொகுப்பின் அலைச்சார்பு Ψ_n என்றால் $\Psi_n^* \Psi_n$ என்பது (Ψ_n^* ஆனது Ψ_n 'பரிமாற்றுச்சிக்கல்' (complex conjugate) எனப்படும். அந்தக் குவான்டம் நிலையில் துகள் இருப்பதற்கான நிகழ்திறனின் அடர்த்தியைக் குறிக்கும்" (probability density).

(இ) மூன்றாவது எடுகோள்

'குவன்டம் எந்திரவியலில், நடைமுறையில் பதிவிடக்கூடிய அளவீடுகள் ஒவ்வொன்றிற்கும் குறிப்பிட்ட ஒரு செயலி (operator) இருக்கும்.'

இச் செயலிகள் ஹெர்மிஷியன் செயலிகளாகத்தான் (Hermitian operators) இருக்கமுடியும். ஏனெனில் ஹெர் மிஷியன் செயலிகளுக்குத்தான் உண்மையான "ஐகென் மதிப் புகள்" (Eigan values) உள்ளன. ஐகென் மதிப்புகள் உண்மை யான அல்லது சிக்கலற்ற மதிப்புகளாக இருந்தால்தான் அவற்றைச் சார்ந்த, பதிவிடக்கூடிய அளவீடுகள் உண்மை அளவீடுகளாக இருக்கமுடியும்.

ஒரு துகளின் இடம், உந்தம், ஆற்றல் இவற்றிற்கான செயலிகள் கீழ்கண்ட அட்டவணையில் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன.

எண்	பதிவிடக்கூடிய அளவீடு	செயலி
1.	நிலை ஆயம் x	x
2.	உந்தம் p_x	$\frac{\hbar}{i}\ \partial/\partial_x$
3.	நிலை ஆற்றல் v	V
4.	இயக்க ஆற்றல் T	$\frac{-\hbar^2}{2m}\ \nabla^2$
5.	மொத்த ஆற்றல் $H=T+V$	$-\left(\frac{\hbar^2}{2m}\right)\nabla^2+V$

துகளின் மொத்த ஆற்றலுக்கான செயலியின் துணைகொண்டும். ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாட்டை நாம் தருவிக்கலாம்.

ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாட்டை நாம் $H\Psi=E\Psi$ என்றும் எழுத லாம். இதில் H என்பது துகளின் ஹாமில்டோனியன் செயலி (Hamiltonian operator). E என்பது ஆற்றலின் ஐகென் மதிப் புகள். Ψ துகளைக் குறிக்கும் அலைச்சார்பு. மேற்கண்ட

சமன்பாட்டில் H-க்குப் பதிலாக $-\left(\frac{\hbar^2}{2m}\right)\nabla^2+v$ என்பதைச் சரியீடு செய்தோமானல்,

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+V\right]\Psi=E\Psi. \qquad \ldots (1.43)$$

அல்லது $$\nabla^2\Psi+\frac{2m}{\hbar^2}(E-V)\Psi=0. \qquad \ldots (1.42)$$

என்ற ஷ்ரோடிஞ்சரின் அதிர்வுறு நிலைக்கான (Stationary State) சமன்பாடு கிடைக்கிறது. இதிலிருந்து குவான்டம் நிலையின் ஆற்றலுக்கான வெவ்வேறு ஐகென் மதிப்புகளைப் பெறலாம்.

1·11. அலைச்சார்பின் இயல்பு

ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாட்டில் நாம் புகுத்தியிருக்கும் அலைச்சார்பு எவ்வாறு ஒரு குவான்டம் தொகுதியின் காட்சிப் பண்புகளை விளக்குகின்றது என்பதை இப்பொழுது கவனிப்போம். முதன்முதலில் 'Ψ' என்ற அலைச்சார்பு, இயற்பியல் சோதனைகளின் முடிவுகளைத் தெளிவுற அறிவதற்காகப் பயன்படுத்தப்படும் ஒரு கணக்கியல் அளவீடு என்றே கருதப் பட்டுவந்தது. படிகமொன்றில் நிகழும் விளிம்பு விளைவுச் சோதனையில், குறிப்பிட்ட ஒரு திசையில் வந்தடையும் அலைச் செறிவுகளைக் கண்டறிய இந்த அலைச்சார்பு பயன்படுத்தப் பட்டது. ஆனல், ஓர் இயற்பியல் விளைவைச் சித்தரிக்கும் ஓர் அலைச்சார்பை விளக்கக் கணக்கியல் அளவீடு மட்டும் போதுமானதன்று. அதற்கு, இயற்பியலைச் சார்ந்த ஒரு பண்பும் இருக்க வேண்டும். ஷ்ரோடிஞ்சர், அலைச்சார்பை, மின்னூட்ட அடர்த்தியைக் கொடுக்கும் ஒரு தொடர் என்றே எண்ணினர். X கதிர்களைப்போன்று எலக்ட்ரான் கற்றைகளும் விளிம்பு விளைவைத் தோற்றுவிப்பதால், ஒளிபோன்ற ஒரு மாதிரியமைப்பைக் கொண்டு அலைச்சார்பை விளக்கலாம் என்று முடிவு செய்யப் பட்டது. A-என்பது ஒரு மின்காந்த அலைத்தொகுப்பின் அலைவீச்சாக இருக்குமேயானல், அதன் 'ஆற்றல்-அடர்த்தி' (Energy density) அல்லது ஓரலகு பருமனுக்கான ஆற்றல் A-ன் வர்க்கத்திற்குச் (A^2) சமமாக இருக்கவேண்டுமென்பது நமக்குத் தெரிந்ததே. ஒரு ஃபோட்டானின் ஆற்றல் '$h\nu$' ஆகையால், $A^2/h\nu$ என்பது ஃபோட்டான் அடர்த்தியைத் தருகின்றது. $h\nu$ என்பது (h-ப்ளாங் மாறிலி, ν ஒளியின் அதிர்வெண்) ஒரு மாறிலியாகையால் அலைத்தொகுப்பிலுள்ள ஃபோட்டான் அடர்த்தி A^2-ன் மதிப்பிற்கு நேர் விகிதத்திலிருக்கும். இதைப் போன்றே, வெளிமண்டலத்தில் ஒரு குறிப்பிட்ட புள்ளியில்

திகழும் 'பொருள்-அலை'யின் அடர்த்தியை அலைச்சார்பு Ψ கொடுக்குமேயானால், ஓரலகுப் பருமனிலுள்ள துகள்களின் எண்ணிக்கை அல்லது 'துகள்-அடர்த்தி'யானது (particle density) Ψ-ன் வர்க்கத்திற்கு (Ψ^2) நேர்விகிதத்திலிருக்கும். எனவே, அலைச்சார்பு Ψ-ன் சார்பிலா மதிப்பின் வர்க்கம் அதாவது $|\Psi^2|$ துகள்-அடர்த்தியை அளப்பதற்குப் பயன்படுத்தப்படுகின்றது. இப்பொழுது 'q' என்பது ஒரு துகளின் மீதுள்ள மின்னூட்டம் என்றால், மின்னூட்ட அடர்த்தியானது துகள் அடர்த்தி $|\Psi^2|$, 'q' இவற்றின் பெருக்குத் தொகைக்குச் சமமாகிறது. எனவேதான் $|\Psi^2|$ என்பது மின்னூட்ட அடர்த்தியை அளவிடப் பயன்படுத்தப்படும் ஒரு தொடர் என்று ஷ்ரோடிஞ்சர் நினைத்தார். அலைச்சார்பு Ψ என்பது ஒரு சிக்கல் எண்ணுகையால் $|\Psi^2|$-க்குப் பதிலாக $\Psi^*\Psi$ என்று எழுதுவது மரபு. இங்கு Ψ^* என்பது Ψ-ன் இணைச்சிக்கல் எண்.

Ψ-க்கு, மேலே கொடுக்கப்பட்ட பொருள் இயற்பியலில் அநேக நிகழ்ச்சிகளை விளக்கியது என்று கூறுவது மிகையாகாது. காட்டாக, அலை எந்திரவியல் விவரிக்கும்.

(1) ஒளி-எலக்ட்ரான்களின் திசைபற்றிய விரிவு (Directional Distribution of Photo electrons).

(2) காம்டன் விளைவில் ஏற்படும் ஃபோட்டான் செறிவு.

(3) போர் அணுமாதிரியின் ஆற்றல் மட்டங்கள் (Energy levels of Bohr atom).

(4) உமிழ்வு நிறமாலை வரிக்கோடுகள் (Iines of emission spectra) முதலியவை. அலைச்சார்பு Ψ-ன் இந்த விளக்கத்தைக் கொண்டே பெறப்பட்டது எனலாம்.

ஆனல் ஒரே ஒரு துகள், அல்லது ஓர் எலக்ட்ரானின் பாதை, இவற்றை இவ் விளக்கம் திருப்திகரமாக விவரிப்பதில்லை. ஏனெனில், 'பொருள்-துகளை' (Material particl) விவரிக்கும் அலைக்கட்டு, சிறிய கால அளவிலேயே அழிந்துவிடுகின்றது. ஆனல் துகள் அழிவதில்லை. இதை அடிப்படையாகக் கொண்டு மேக்ஸ் பார்ன் (Max Burn) என்ற ஜெர்மானிய விஞ்ஞானி அலைச்சார்பிற்குப் பின்வரும் விளக்கத்தைக் கொடுத்தார். இது பின்னர் ஐசன்பெர்க் (Heisenberg), டிராக் (Dirac) போன்ற இயற்பியல் வல்லுநர்களாலும் உண்மையென்று கொள்ளப் பட்டது.

இதன்படி $\Psi\Psi^* = |\Psi|^2$ என்பது, Ψ-என்ற குவான்டம் நிலையில் நிகழும் 'நிகழ்திறன்-அடர்த்தி'யைக் (Probability density) கொடுக்கிறது. $d\tau=dx.dy.dz$ என்ற ஒரு சிறிய பருமனில்,

r^{-1} என்ற வெக்டர் குறிக்கும் ஒரு புள்ளியில், t-கால அளவில் துகளைக் காண்பதற்கான நிகழ்திறன் p,

$$P = P\ (r^{-1})\ d\eta = |\ \Psi\ (r^{-1},\ t)\ |^{2}\ d\eta$$

என்ற கோவையால் கொடுக்கப்படுகின்றது.

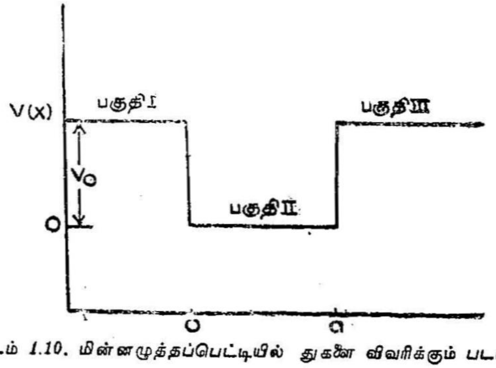
'Ψ -என்ற அலைச்சார்பு, ஒரு துகளின் உறைவிடத்தின் 'நிகழ்திறன் - வீச்சு' (Probability amplitude) என்றழைக்கப் படுகின்றது. பார்ன் அவர்களால் Ψ-க்குக் கொடுக்கப்பட்ட பொருள், குவான்டம் எந்திரவியலின் விதிகளையும், அவற்றை யொட்டிய அளவீடுகளுக்கான முடிவுகளையும், "நிகழ்திறன்" ஆய்வுகளைக் கொண்டு விளக்கமுடியும் என்பதனை வலியுறுத்து கின்றது.

1·12. ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாட்டைச் சிக்கலற்ற பரிமாணமுள்ள சில குவான்டம் இயக்கங்களில் பயன்படுத்துதல்

மின்னழுத்தப் பெட்டியில் துகள்: ஆற்றல் ஐகென் மதிப்பு காணல்.

ஒரு மின்னழுத்தப் பெட்டியில், அதன் பக்கப் பரப்புகளுக்குச் செங்குத்தாக இயங்கிக்கொண்டிருக்கும் துகள் ஒன்றின் ஆற்றல் ஐகென் மதிப்புகளை ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாட்டிலிருந்து எவ்வாறு தருவிக்கலாம் என்று காண்போம்.

$x = o$, $x = a$ என்ற இடங்களிலிருக்கும் பெட்டியின் சுவர்களின் வெளியே இடப்புறத்திலும் வலப்புறத்திலும் உள்ள ஆற்றல், துகளின் ஆற்றலைவிட மிகுதி என்று கொள்ளலாம். $x = o$, $x = a$ என்ற பகுதிகளில் துகள் இயக்க ஆற்றலை மட்டுமே கொண்டிருக்கும். இப் பகுதிகளில் V சுழியாக இருக்கும். இது படம் (1.10)-ல் காட்டப்பட்டுள்ளது.



படம் 1.10. மின்னழுத்தப்பெட்டியில் துகளை விவரிக்கும் படம்.

துகளின் ஆற்றல் ஒரு மாறிலியாக உள்ளதால் E நேரச் சார்புள்ள தொடர் அன்று. எனவே ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாடு $H\Psi = E\Psi$ என்பது.

$$-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\nabla^2 \Psi + V\Psi = E\Psi \qquad \dots \quad (1.44)$$

என்றாகிறது.

இதில் Ψ என்பது துகளின் இடத்தின் ஆயக்கூறுகளைப் பொருத்த அலைத்தொடரைக் குறிக்கின்றது. சமன்பாடு (*1.44*) 'ஒரு துகளின் நேரச் சார்பற்ற சமன்பாடாகும்' என்று முன்னரே கண்டோம். துகள் *X*-திசையில் மட்டும் இயங்குமானால் சமன்பாடு

$$\frac{h^2}{8\pi^2 m} \cdot \frac{d^2\Psi}{dx^2} - V\Psi = E\Psi \qquad \dots \quad (1.45)$$

என மாறுகின்றது. அல்லது

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E - V)\,\Psi = 0 \qquad \dots \quad (1.46)$$

என ஆகிறது. இது சமன்பாடு (*1.44*)-ன் சிறப்பு மறு அமைப்பு (Special form) எனலாம்.

மேற்கண்ட சமன்பாட்டிற்குத் தீர்வு காண்பதற்கு *X*-அச்சைப் படத்தில் காட்டியவாறு மூன்று 'இடங்களாக'ப் பிரித்துக் கொள்ளலாம். $x = 0$-வுக்கு இடது பக்கத்திலிருப்பதை முதல் இடம் (Region I) என்றும், $0 < x < a$ என்ற இடத்தை இரண்டாம் இடம் (Region II) என்றும் $x = a$-க்கு வலது பக்கத்திலுள்ள இடத்தை மூன்றும் இடம் (Region III) என்றும் கொள்ளலாம். முதலிடத்திலும் மூன்றும் இடத்திலும் துகளின் மின் அழுத்தம் V_0 என்ற மதிப்புடைய மாறிலியாக இருக்கும். இரண்டாவது இடத்தில் துகளின் மின்னழுத்தம் *V* சுழியாக இருக்கும். *E* என்ற ஆற்றலை இரண்டாவது இடத்திலுள்ள துகளின் இயக்க ஆற்றல் என்றும் கொள்ளலாம். சமன்பாடு (*1.46*) மூன்று இடங்களிலும் வெவ்வேறு தீர்வுகளைக் கொண்டுள்ளது. அவையாவன:

$$\text{II}: \quad \Psi(x) = A e^{i\alpha x} + B e^{-i\alpha x}. \qquad \dots \quad (1.47)$$

$$: \quad \Psi(x) = C e^{\beta x} + D e^{-\beta x} \qquad \dots \quad (1.48)$$

$$\text{III}: \quad \Psi(x) = C' e^{\beta x} + D' e^{-\beta x} \qquad \dots \quad (1.49)$$

$$\left.\begin{aligned}&\text{இவற்றில்}\quad \alpha = \left[\frac{8\pi^2 mE}{h^2}\right]^{1/2}\\ &\beta = \left(\frac{2\pi}{h}\right)\left[2m\,(V_0 - E)\right]^{1/2}\quad \text{ஆகும்.}\end{aligned}\right\} \quad \dots (1.50)$$

இதில் V_0-ன் மதிப்பு E-யின் மதிப்பைவிட மிகுதியாகையில், β என்பது ஒரு மெய் எண் (real number) ஆகும்.

A, B, C, D, C', D' ஆகிய மாறிலிகளின் மதிப்புகளைப் பின் வரும் எல்லை நிபந்தனைகளிலிருந்து கணக்கிடலாம்.

$$x=0 \text{ ஆனல் } \quad \Psi_I = \Psi_{II}, \quad \frac{d\Psi_I}{dx} = \frac{d\Psi_{II}}{dx} \quad \dots (1.51)$$

$$x=a \text{ ஆனல் } \quad \Psi_{II} = \Psi_{III}, \quad \frac{d\Psi_{II}}{dx} = \frac{d\Psi_{III}}{dx} \quad \dots (1.52)$$

மேற்கண்ட நிபந்தனைகளல்லாமல், Ψ முடிவுள்ளதாக (finite) இருக்கவேண்டுமானல், $\Psi(o) = A+B=C$

$$\text{மற்றும்} \quad \frac{d\Psi(o)}{dx} = c\beta = iA\alpha - i\beta\alpha$$

$$\text{இதிலிருந்து} \quad A = \frac{B\,(i\alpha+\beta)}{i\alpha-\beta} \quad \text{என்பது கிடைக்கிறது.}$$

எனவே, $x = a$ ஆக இருக்கும்போது,

$$\Psi(a) = A\,e^{i\alpha a} + B\,e^{-i\alpha a} = D'\,e^{-\beta a}$$

$$\text{மற்றும்} \quad \frac{d\,\Psi(a)}{dx} = i\alpha A\,e^{i\alpha a} - i\alpha B\,e^{-i\alpha a}$$

$$= \beta D'\,e^{-\beta a}$$

மேற்கண்ட சமன்பாட்டினை β-வினல் வகுத்தால்

$$D'e^{-\beta a} = \frac{-i\alpha}{\beta}\left(Ae^{i\alpha a} - Be^{-i\alpha a}\right)$$

$$= Ae^{i\alpha a} + Be^{-i\alpha a}$$

இதிலிருந்து A-க்குத் தீர்வு காணில்

$$A = \frac{Be^{-i\alpha a}}{e^{i\alpha a}}\;\frac{(i\alpha-\beta)}{i\alpha+\beta} \quad \text{என்று கிடைக்கும்.}$$

இதனை மேலே உள்ள A-விற்கான சமன்பாட்டில் சரியீடு செய்தால்,

$$Cot\ \alpha a = \tfrac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{\beta} - \frac{\beta}{\alpha}\right) \qquad \ldots \quad (1.53)$$

என்பது கிடைக்கும்.

மேற்கண்ட சமன்பாடு α, β மாறிலிகள் பெட்டியின் இரு சுவர்கள் ஆகியவற்றை இணைக்கின்றது. α, β மாறிலிகளின் மதிப்புகளை V, E இவற்றின் மதிப்புகளிலிருந்து பெறலாம், V, E-க்களின் மதிப்புகள் கொடுக்கப்பட்டால், β-ன் மதிப்பைச் சுலபமாக நிர்ணயிக்கலாம், சமன்பாடு (1.53)ஐ உண்மைப் படுத்தும் α-வின் மதிப்புகள், எல்லா ஆற்றல் மட்டங்களையும் கொடுக்கும்.

மின்னழுத்தப் பள்ளம் V_0 ஈறிலியாகும்போது சமன்பாடு இன்னும் சுருங்குகிறது.

$$\beta = \frac{2\pi}{h}\left[2m\left(V_0 - E\right)\right] \longrightarrow \infty$$

$$\frac{\alpha}{\beta} \longrightarrow 0 \quad \text{எனவே} \quad cot\ \alpha a = -\ \infty$$

α-க்களுக்குத் தீர்வு காணில்

$$\alpha a = n\pi \qquad \ldots \quad (1.54)$$

என்று கிடைக்கும்.

இதில் n என்பது நேர்க்குறி அல்லது எதிர்க்குறி உடைய ஒரு முழு எண். $n = 0$ ஆனால் α-வும் சுழியாகும். இப்பொழுது அலைத்தொடரும் சுழியாகும். இதனால் நடைமுறையில் ஒரு பயனு மில்லையாகையால் இதனை விலக்கிவிடலாம்.

$\alpha^2 = \dfrac{8\pi^2\, mE}{h^2}$ என்பதையும் சமன்பாடு (1.54)-ஐயும் இணைத்தால்,

$$\alpha^2 = \frac{8\pi^2\ m\ \ Tn}{h^2} \quad [E = Tn].$$

$$\therefore \quad \alpha^2 = \frac{n^2\ \pi^2}{a^2} = \frac{8\pi^2\ \ m\ Tn}{h^2}$$

எனவே, $Tn = \frac{n^2 h^2}{8m a^2}$ — $n = 1, 2, 3, \ldots\ldots$ ... (1.55)

மேற்கண்ட சமன்பாடு X-திசையில் துகளின் இயக்க வாற்றலைக் குறிக்கிறது. n நேர்க்குறி அல்லது எதிர்க்குறி ஆகியவற்றில் எதனைக் கொண்டிருந்தாலும் $Tn \propto n^2$ ஆனதால், ஒரே இயக்கவாற்றல்தான் கிடைக்குமென்பது இங்குக் குறிப்பிடத் தக்கது. நமக்கு ஆற்றல்தான் முக்கியமே தவிர, அது x அச்சின் எதிர்க்குறித் திசையிலுள்ளதா அல்லது நேர்க்குறித் திசையிலுள்ளதா எனக் கவலைப்படத் தேவையில்லை. இங்கு நாம் n-ன் நேர்க்குறி மதிப்புகளை மட்டும் எடுத்துக்கொள்வோம். $\beta = \alpha$ ஆக இருக்கும்போது $A = -B$ ஆக இருக்கும். இதிலிருந்து இரண்டாவது இடத்திற்கான அலைத்தொடர் Ψ-யை,

$$\Psi(x) = i\ 2A\ Sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) = A'\ Sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \quad \ldots \quad (1.66)$$

என்று எழுதலாம்.

முதல் இடத்தில், $\Psi(x) = 0$. ஏனெனில், $D_1\ C_1 = A+B = 0$ ஆகிறது. மற்றும் $e^{-\beta x} = 0$ ஆவதால் மூன்றும் பகுதியிலும் $\Psi(x) = 0$ ஆகிறது. எனவே $0 \leq x \leq a$ என்ற இடத்தில் $\Psi(x)$-ன் மதிப்பு (1.56)-வது சமன்பாட்டில் கொடுக்கப்பட்டதற்குச் சமமாகவும், மற்ற இடங்களில் எல்லாம் சுழியாகவும் ஆகிறது.

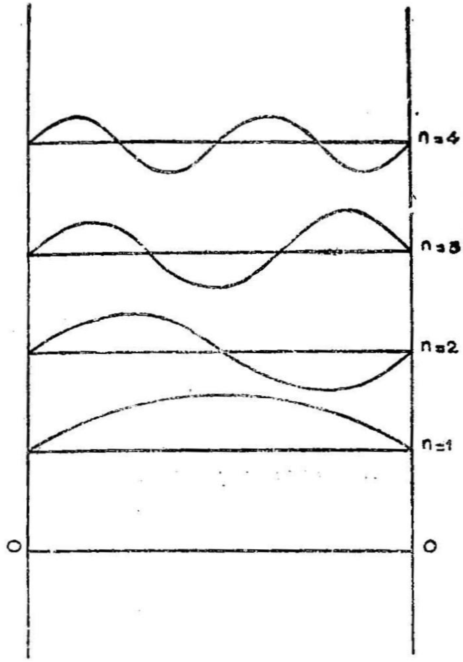
A' என்ற மாறிலியின் மதிப்பு, பெட்டியிலுள்ள துகள்களின் எண்ணிக்கையைப் பொருத்திருக்கிறது. இங்கு, பெட்டியில் ஒரு துகள்தான் உள்ளதென்று கொண்டால், $x=0$, $x=a$ என்ற இரண்டு எல்லைகளுக்கிடையில் துகள் காணப்படுவதற்கான 'நிகழ்திறன்', 'ஒன்று' ஆகிறது. இதைக் கொண்டு A'-யின் மதிப்பைப் பெறலாம். இதை நாம் அலைத்தொடரின் நேர்க்குத்தாக்கல் (normalisation) என்கிறோம்.

அதாவது
$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi^2|\, dx = A'^2 \int_0^a Sin^2\left(\frac{n\pi x}{a}\right) dx$$
$$= 1 \quad \ldots \quad (1.57)$$

இதிலிருந்து $A'^2 \left(\frac{a}{2}\right) = 1$ அல்லது

$$A' = \left(\frac{2}{a}\right)^{\frac{1}{2}}$$ எனக் கிடைக்கிறது.

எனவே, $\Psi = \left(\frac{2}{a}\right)^{1/2} Sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) n = 1, 2, 3, \ldots \quad \ldots (1.58)$



படம் 1.11. பெட்டியில் துகளுக்கான அலைச்சார்பு

ஆற்றலுக்கான சமன்பாடு (1.55) ஐ எடுத்துக்கொள்வோம். $n = 1$ ஆனால், $E_1 = h^2/8\,ma^2$ என்ற சமன்பாடு கிடைக்கும். $m = 9{\cdot}1 \times 10^{-28}$ கிராம் நிறைகொண்ட எலக்ட்ரான், ஹைட்ரஜன் அணுவின் (விட்டம் 10^{-8} செ.மீ.) அளவுள்ள பெட்டியில் இருப்பதாகக் கொண்டு, மேற்கண்ட சமன்பாட்டில் இம் மதிப்புகளைச் சரியீடு செய்து, ஹைட்ரஜன் அணுவிலுள்ள எலக்ட்ரானின் அடிமட்ட ஆற்றலைக் கணக்கிட்டால், அது ஏறத்தாழச் சோதனைகளிலிருந்து பெறப்படுகின்ற ஆற்றலுக்குச் சமமாக இருக்கின்றது என்பது இங்குக் குறிப்பிடத்தக்கது.

1·13. நேர்கோட்டுச் சீரிசை அலைவி (Simple Harmonic Oscillator)

ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாட்டை, நேர்கோட்டில் சீரிசை அலைவு கொண்ட துகள் ஒன்றிற்கும் பயன்படுத்தலாம். இது மூலக்கூறு நிரல்மானியியலில் மிக முக்கியத்துவம் வாய்ந்ததாகும். எனவே, இங்கு 'நேர்கோட்டுச் சீரிசை அலைவி' ஒன்றிற்கான ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாட்டைத் தருவித்து அதன் தீர்வைக் காண்போம்.

நேர்கோட்டுச் சீரிசை அலைவு இயக்கங்கொண்ட ஒரு துகளின்மீது தொழிற்படும் திருப்புவிசை அதன் பெயர்ச்சிக்கு நேர்விகிதத்தில் இருக்கும். அதாவது,

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx. \qquad \ldots (1.59)$$

இதில் 'm' என்பது துகளின் நிறையையும் K ஒரு மாறிலியையும் குறிக்கும். சமன்பாடு (1.59)-க்குத் தீர்வு காணில்,

$$x = A \operatorname{Sin}(Bt+C) \qquad \ldots (1.60)$$

என்பது கிடைக்கும்.

இதில் A, B, C என்பவை மாறிலிகள். அலைவானது அடுத்தடுத்து நிகழும் ஓர் இயக்கமாகையால், ஒவ்வோர் அலைவிற்குப் பின்பும் எல்லா நிபந்தனைகள் யாவும் மீண்டும் மீண்டும் செயல்படும். நேரம் t ஆக இருக்கும்போது $x=0$.

எனவே, $c = 0$.

நேரம் $t = T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{2\pi \nu} = \frac{1}{\nu}$ ஆனால், $x = 0$.

$$\therefore \quad 0 = A \operatorname{Sin}(B/\nu) = 0. \text{ அல்லது } B = 2\pi \nu \qquad \ldots (1.61)$$

B-யின் மதிப்பைச் சமன்பாடு 1.60-ல் சரியீடு செய்தால்,

$$x = A \operatorname{Sin}(2\pi \nu t + c) \qquad \ldots (1.62)$$

என்று கிடைக்கும்.

இதை இருமுறை வகைகெழு செய்து, சமன்பாடு (1.59)-ல் பொருத்தினல்

$$\frac{dx}{dt} = 2\pi \nu . \quad A \cdot \cos(2\pi \nu T)$$ என்பது பெறப்படும்.

தவிர, $\frac{d^2 x}{dt^2} = -4\pi^2 \nu^2 A \text{ Sin } 2\pi \nu T.$

எனவே $-m.4\pi^2 \nu^2 \text{ Sin } 2\pi \nu T = -KA \text{ Sin } 2\pi \nu T.$

அல்லது $K = 4\pi^2 \nu^2 m$ ... (1.60)

அலைவியின் உறுதிநிலை ஆற்றல் $V = \frac{1}{2} kx^2$

அதாவது $V = \frac{1}{2}. \ 4\pi^2 \nu^2 m x^2$

$= 2\pi^2 \nu^2 mx^2$ ... (1.61)

இப்பொழுது இந்த உறுதிநிலையாற்றல் V-யை ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாட்டில் சரியீடு செய்தல் வேண்டும்.

x அச்சில் அலைவுறும், ஒரு துகளின் ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாட்டை,

$$\frac{d^2 \Psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E - V)\Psi = 0. \quad \dots (1.46)$$

என்று எழுதலாமென்று முன்னரே கண்டோம். இதில் Ψ என்பது அலைவுறுகின்ற துகளின் 'நிலையைக்' குறிக்கும். அலைத் தொடர். E என்பது துகளின் மொத்த ஆற்றலுக்கான 'ஐகென்' மதிப்பு. சமன்பாடு 1.46-ல் V-யின் மதிப்பைச் சரியீடு செய்தால்

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E - 2\pi^2\nu^2 mx^2)\Psi = 0 \quad \dots (1.62)$$

$\frac{8\pi^2 mE}{h^2}$ என்பதை 'a' எனவும்

$\frac{4\pi^2 \nu^2 m}{h^2}$ என்பதை 'b' எனவும் ... (1.63)

எழுதினால், சமன்பாடு (1·62)

$$\frac{d^2 \Psi}{dx^2} + (a - b^2 x^2)\Psi = 0 \quad \dots (1.64)$$

என ஆகிறது.

இப்பொழுது $q = x\sqrt{b}$ ... (1.65)

என்ற மாறிலியைப் (variable) பயன்படுத்திச் சமன்பாடு 1.64-ஐ மீண்டும் வேறு வகையாக எழுதலாம்.

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \sqrt{b} \quad \dots (1.66)$$

இப்பொழுது, $\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial q} \cdot \frac{\partial q}{\partial x}$ ... (1.67)

எனவே, $\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial q} \cdot \sqrt{b}$ ... (1.68)

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\partial}{\partial q}\sqrt{b}\right]$$

$$= \frac{\partial}{\partial q}\sqrt{b}\left(\frac{\partial}{\partial q}\sqrt{b}\right)$$

எனவே, $\frac{\partial^2}{\partial x^2} = b\ \frac{\partial^2}{\partial q^2}$ என்று ஆகிறது.

சமன்பாடு 1.65-ஐச் சமன்பாடு 1.64-ல் சரியீடு செய்தால்,

$$\frac{d^2\ \Psi}{dq^2} + (a - q^2)\ \Psi = 0. \qquad \ldots\ (1.69)$$

$$\frac{d^2\ \Psi}{d^2\ q} + \left(\frac{a - q^2}{b}\right)\Psi \qquad \ldots\ (1.69)$$

என்பது கிடைக்கும். Ψ என்ற அலைத்தொடரானது ஒரு "நல்ல பண்புள்ள" (well behaved) அலைச்சார்பாகும். அதாவது $-\infty$ யிலிருந்து $+\infty$ வரை உள்ள x-ன் எல்லா மதிப்புகளுக்கும் அது ஒரே மதிப்புடையதாகவும் (Single valued), தொடர்ச்சியானதாகவும் (Continuous), முடிவுள்ளதாகவும் (finite) இருக்கும்.

1·46. சமன்பாட்டிற்கான ஈற்றணுகித் தீர்வு (Asymptotic Solution)

q-ன் மதிப்பு $\sqrt{a/b}$-ன் மதிப்பைவிட மிக அதிகமாக இருந்தால் ($q >> \sqrt{a/b}$) ஈறணுகு கோட்டுத் தீர்வைச் சுலபமாகக் கணக்கிடலாம். இந்த வகை நிபந்தனையின் கீழ், சமன்பாடு (1 69)

$$\frac{d^2\ \Psi}{dq^2} - q^2\ \ \Psi = 0 \qquad \ldots\ (1.70)$$

எனச் சுருங்குகிறது. இச் சமன்பாட்டின் தீர்வுகளை

$\Psi = e^{\pm\, q^2/2}$ எனக்கொண்டு, வகைகெழு இருமுறை காணில்,

$$\frac{\partial\ \Psi}{\partial\ q} = e^{\pm q^2/2}\, q$$

$$\frac{\partial^2\ \Psi}{\partial q^2} = q^2\, e^{\pm q^2/2} \pm e^{\pm q^2/2}.$$

$$= e^{\pm q^2}\,[q^2 + 1].$$

q-வின் மதிப்பு அதிகமாக இருப்பதால் $q^2 \pm 1 \approx q^2$. எனவே சமன்பாடு (1·70)

$$q^2 e^{\pm(q^2/2)} - q^2 e^{\pm q^2/2} = 0$$ என ஆகிறது.

எனவே $e^{\pm q^2/2}$, சமன்பாடு (1·70)-ன் தீர்வு ஆகிறது.

$e^{+q^2/2}$, $e^{-q^2/2}$ என்ற இரண்டு தீர்வுகளில், $|\Psi|^2$ என்பது x அச்சில் ஏதாவது ஓர் இடத்தில் துகள் இருப்பதற்கான நிகழ்திறனைக் குறிப்பதால் இரண்டாவது தீர்வுதான் ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாட்டிற்குப் பொருந்தும். ஏனெனில் x-ன் மதிப்பு $-\infty$ அல்லது $+\infty$ ஆக இருக்குமானல் மேற்கூறிய நிகழ்திறன் சுழியாகிவிடும். எனவே $e^{-q^2/2}$ என்ற தீர்வுதான் மேற்கண்ட தேவையை நிறைவு செய்கிறது எனலாம். எனவே ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாட்டின் தீர்வைக் கீழ்க்கண்டவாறு எழுதலாம்.

$$\Psi = e^{-q^2/2} \cdot f(q) \qquad \ldots \quad (1{\cdot}71)$$

q-ஐப் பொருத்து இதற்கு வகை கெழு காணில்

$$\frac{\partial \Psi}{\partial q} = e^{-q^2/2} f' - f(q) \cdot q\, e^{-q^2/2}$$ என்றும்

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial q^2} = e^{-q^2/2} f'' - f' \cdot q \cdot e^{-q^2/2}$$

$$- [f \cdot e^{-q^2/2} + q\, e^{-q^2/2} \cdot f' - f\, q^2 e^{-q^2/2}]$$

$$= e^{-q^2/2} [f'' - 2 f' q + (q^2 - 1) f]$$

என்றும் கிடைக்கும்.

இதைச் சமன்பாடு (1.69)-ல் சரியீடு செய்தால்

$$e^{-q^2/2} [f'' - 2q f' + (q^2 - 1) f] + e^{-q^2/2}\left(\frac{a}{b} - q^2\right) f = 0. \qquad \ldots \quad (1.72)$$

என்பது கிடைக்கின்றது. அல்லது

$$e^{-q^2/2}\left[f'' - 2q\, f' + \left(\frac{a}{b} - 1\right) f\right] = 0.$$

எனவே,

$$f'' - 2q f' + \left(\frac{a}{b} - 1\right) f = 0. \qquad \ldots \quad (1.73)$$

$f(q)$ என்ற சார்புப் பலனைக் (function) கீழ்க்கண்டவாறு அடுக்குத் தொடரில் எழுதலாம்.

$$f(q) = \alpha_0 + \alpha_1 q + \alpha_2 q^2 + \ldots$$

பின்னும் $f'(q) = \alpha_1 + 2\alpha_2 q + 3\alpha_3 q^2 + 4\alpha_4 q^3 + \ldots$

$$f''(q) = 2\alpha_2 + 6\alpha_3 q + 12\alpha_4 q^2 + 20\alpha_5 q^3 + \ldots$$

இவற்றைச் சமன்பாடு (1·73) ல் சரியீடு செய்தல்

$$2\alpha_2 + 6\alpha_8 q + 12\alpha_4 q^2 + 20\alpha_5 \alpha^3 + \ldots$$
$$- 2\alpha_1 q - 4\alpha_2 q^2 - 6\alpha_3 q^3 - \ldots$$
$$+ \left(\frac{a}{b} - 1\right)\alpha_0 + \left(\frac{a}{b} - 1\right)\alpha_1 q + \left(\frac{a}{b} - 1\right)\alpha_2 q^2$$
$$+ \left(\frac{a}{b} - 1\right) \alpha_0 q^3 + \ldots = 0 \qquad \ldots (1.74)$$

என்ற சமன்பாடு கிடைக்கிறது.

$f(q)$ என்பது ஒரு தீர்வாக இருக்கவேண்டுமானல் q-ன் ஒவ்வோர் அடுக்கின் குணகமும் (coefficient) சுழியாக வேண்டும்.

எனவே q^0-வின் குணகத்தைச் சுழிப்படுத்தினல்

$$2\alpha_2 + \left(\frac{a}{b} - 1\right) = 0 \qquad \ldots (1.75)$$

என்பது கிடைக்கும்.

இதைப்போன்றே q^1-ன் குணகத்திற்கு

$$6\alpha_3 - 2\alpha_1 + \left(\frac{a}{b} - 1\right) \alpha_1 = 0 \text{ என்றும்} \qquad \ldots (1.76)$$

q^2ன் குணகத்திற்கு

$$12\alpha_4 - 4\alpha_2 + \left(\frac{a}{b} - 1\right) \alpha_2 = 0 \qquad \ldots (1.77)$$

என்றும் சமன்பாடுகள் கிடைக்கும்.

பொதுவாக q^n-ன் குணகத்திற்கு

$$(n+1)(n+2)\, \alpha_{n+2} - 2n\alpha_n + \left(\frac{a}{b} - 1\right) \alpha_n = 0 \qquad \ldots (1.78)$$

என்ற சமன்பாடு கிடைக்கும்.

$$\text{இதிலிருந்து } \frac{\alpha_{n+2}}{\alpha_n} = \frac{2n - \frac{a}{b} + 1}{(n+1)(n+2)} \qquad \dots (1.79)$$

என்ற சமன்பாட்டைப் பெறலாம்.

இங்கு n என்பது சுழியாகவோ, அல்லது ஏதாவது ஒரு முழு எண்ணாகவோ இருக்கலாம்.

சமன்பாடு (1.79) "மடங்கு வாய்பாடு" (Recursion formula) என அழைக்கப்படுகிறது.

q^n-ன் குணகமான α_n-ன் மதிப்பு தெரிந்திருந்தால், இந்த வாய்பாட்டைப் பயன்படுத்தி α_{n+2}-ன் மதிப்பைப் பெறலாம். q^0-ன் மதிப்பு தெரிந்தால் q^n-ன் மதிப்பை இதனின்றும் பெறலாம்.

1·14. நேர்கோட்டுச் சீரிசை அலைவியின் ஆற்றல்

a/b-ன் மதிப்பிற்கு ஒரு நிபந்தனை இருந்தால் அன்றி, $e^{-q^2/2} f(q)$ என்பது சமன்பாடு (1·69)-ன் சரியான தீர்வாக இருக்கமுடியாது. $f(q)$ என்பதை ஓர் அடுக்குத் தொடராக விரிவு படுத்தினால், சார்புப்பயன் $e^{-q^2/2} \cdot f(q)$-ன் மதிப்பு q-ன் மதிப்பு அதிகரிக்க அதிகரிக்க வெகு வேகமாக அதிகரிக்கும். ஆனால் $f(q)$ என்பதை ஒரு பல்லுறுப்புக் கோர்வை (polynomial) என்று கொண்டோமானால், அந்தச் சார்புப்பயன் ஒரு குறிப்பிட்ட மதிப்பிற்கு "ஒருங்குபடுகிறது" (converges). அவ்வாறே $\frac{\alpha n+2}{\alpha n}$ என்ற a/b-ன் மதிப்பிற்கு ஒரு நிபந்தனை கொடுத்து ஒருங்குபடுகிறது. எனவே $e^{-q^2/2} f(q)$ என்பது சமன்பாடு (1·69)-க்கு ஒரு சரியான தீர்வாகிறது. $f(q)$ ஒரு பல்லுறுப்புக் கோர்வையாக இருக்க வேண்டுமானால் $\frac{\alpha n+2}{\alpha n}$-ன் மதிப்பு சுழியாக இருக்க வேண்டும்.

$$\text{அதாவது } 2n - \frac{a}{b} + 1 = 0$$

அல்லது

$$\frac{a}{b} - 2n - 1 = 0$$

$$\therefore \frac{a}{b} = 2n + 1 \qquad \dots (1·80)$$

இந்த a/b-ன் மதிப்பைச் சரியீடு செய்தால், மேற்கண்ட நிபந்தனையின்படி q^{n+2} என்பது அதற்கடுத்த உறுப்புகளின் குணகங்கள் சுழியாக்கப்படுவதால், q-விற்குப் பிறகு கோர்வை முடிவடைந்துவிடுகிறது.

$\frac{a}{b}$-ன் மதிப்பிற்குச் சரியீடு செய்தால்

$$\frac{a}{b} = \frac{2E}{h\nu} = 2n+1$$

அல்லது $E_n = (n+\frac{1}{2})\, h\nu$ ... (1·81)

இதில் n என்பது சுழியாகவோ அல்லது முழு எண்ணுகவோ இருக்கும்.

நேர் கோட்டுச் சீரிசை அலைவிக்கான, ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாட்டின் ஏற்றுக்கொள்ளத்தக்கத் தீர்வுகள், சமன்பாடு (1·81)-ல் கண்ட ஆற்றல்களைக் கொண்டுதான் பெறமுடியும், எனவே நேர் கோட்டுச் சீரிசை அலைவியின் ஆற்றல்மட்டங்கள் தொடர்ச்சியாக இராமல் தனித்தனியாக (discrete) உள்ளன. $n = 0$ ஆக இருக்கும் போது

$$E_0 = \tfrac{1}{2}\, h\nu \qquad \ldots \quad (1{\cdot}82)$$

E_0 என்பது அலைவியின் அடிமட்ட ஆற்றலைக் குறிக்கின்றது. இது பண்டைய இயற்பியலின் கொள்கைக்குப் புறம்பாக உள்ளது. பண்டை எந்திரவியலின்படி தனிச்சுழி வெப்ப நிலையிலுள்ள (Absolute zero) பொருள் ஒன்றின் அணுக்களோ அல்லது மூலக் கூறுகளோ ஒருவித இயக்கமும் இல்லாமல் இருக்கும் எனவும், சுழியாற்றல் பெற்றிருக்குமெனவும் அறிவோம். ஆனல், சுழி வெப்ப நிலையிலும் இவை ஆற்றலைப் பெற்றிருக்கும் என குவான்டம் எந்திரவியல் கூறுகிறது.

1·15. நேர் கோட்டுச் சீரிசை அலைவிக்கான அலைத் தொடர்கள்

சீரிசை அலைவியின் ''ஐகென் சார்புப்பயனை'' (Eigan function)

$\Psi n = e^{-q^2/2} \cdot f(q)$ என்ற சமன்பாடு கொடுக்கிறது. $f(q)$ என்பது ஒரு பல்லுறுப்புக் கோர்வை. இதனைச் சிறிதே மாற்றி அமைத்தோமானல்,

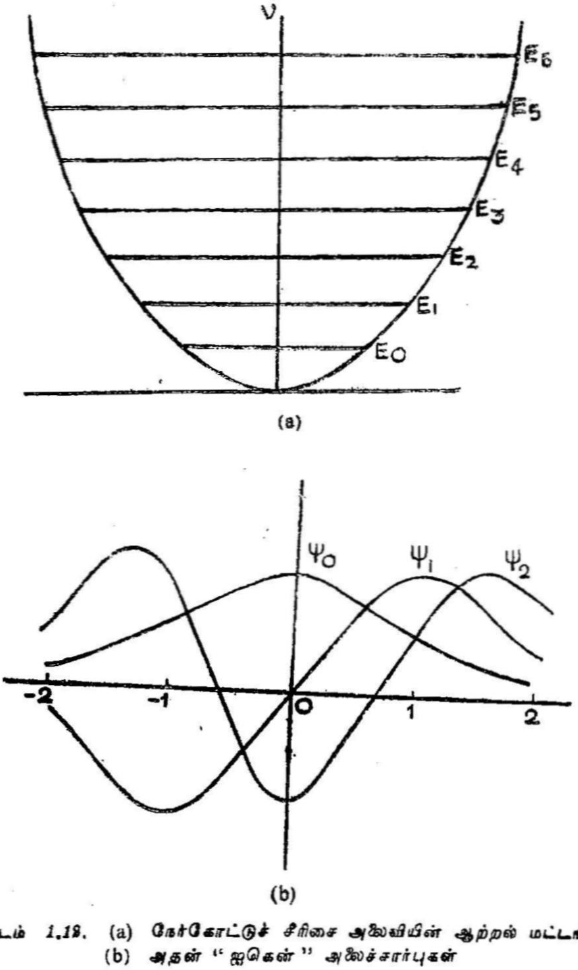
$$\Psi_n = N_n\, e^{-q^2/2} H_n(q) \qquad \ldots \quad (1{\cdot}83)$$

என்ற சமன்பாடு கிடைக்கும்.

இதில் N_n என்பது "நேர்க்குத்துப்படுகை மாறிலி" (**Normalisation Constant**). $H_n(q)$ என்பது

$$H_n(q) = (-1)_n e^{q^2} \frac{d^n e^{-q^2}}{dq^n} \qquad \dots (1\cdot 84)$$

என்ற சமன்பாட்டால் குறிக்கப்படும் ஒரு பல்லுறுப்புக் கோர்வை



படம் 1.18. (a) நேர்கோட்டுச் சீரிசை அலைவியின் ஆற்றல் மட்டங்கள்
(b) அதன் "ஐகென்" அலைச்சார்புகள்

இது n வகையீடு கொண்ட ஹெர்மிட்டின் பல்லுறுப்புக் கோர்வை (Hermite polynomial).

$n = 0$	ஆக இருக்கும்போது	$H_0(q) = 1$
$n = 1$	,,	$H_1(q) = 2q$
$n = 2$	,,	$H_2(q) = 4q^2 - 2$
$n = 3$	,,	$H_3(q) = 8q^3 - 12q$
...	...	...

என்ற பல்லுறுப்புக் கோர்வைகள் கிடைக்கும்.

வினாக்கள்

1. டி பிரோக்லியின் 'பொருள்-அலை'க் கொள்கையினை விளக்குக.

   துகள்-அலை ஒன்றின் அலைநீளத்திற்கான சமன்பாட்டைத் தருவி.

2. பொருளின் இரட்டைப்பண்பை விவரிக்கும் டி பிரோக்லியின் அலைக்கொள்கையை எவ்வாறு டேவிசன்-ஜெர்மர் சோதனை விளக்குகின்றது?

3. ஜி.பி.தாம்சனின் எலக்ட்ரான் 'விளிம்பு வளைவு' சோதனையை விவரித்து அது எவ்வாறு டி பிரோக்லியின் அலைக்கொள்கைக்குச் சோதனைச்சான்றாக அமைகின்றது என்பதனை விளக்குக.

4. 1, 10, 100, 1000 எ.வோ. ஆற்றல்களைக் கொண்ட எலக்ட்ரான்களின் அலைநீளங்களைக் கணக்கிடுக.

5. 0.04 எ.வோ இயக்கவாற்றலும், 1.67×10^{-27} கிராம் நிறையும் கொண்ட நியூட்ரானின் டி பிரோக்லி அலை நீளத்தைக் கணக்கிடுக.

6. ஹைசன் பெர்கின் "ஐயப்பாட்டுக்கொள்கை"யை விளக்குக. இக் கொள்கையின் விளைவுகளில் சில வற்றைத் தருக.

7. ஓர் எலட்க்ரானின் திசைவேகம் 1.05×10^4 மீட்டர்/செகண்டு. இது 0.01 விழுக்காட்டிற்குத் துல்லியமாகக் கணக்கிடப்பட்டிருக்கின்றது. அந்த எலக்ட்ரானின்

உறைவிடத்திலுள்ள உறுதிப்பாடிலாமையைக் கணக்கிடுக.

[விடை: 1.1×10^{-4} மீட்டர்கள்]

8. எலட்க்ரான் நுண்ணோக்கி செயல்படும் விதத்தைக் கொள்கை விளக்கத்துடன் விவரிக்க. எலக்ட்ரான் நுண்ணோக்கி, ஒளி நுண்ணோக்கியைவிட எந்த வகையில் சிறந்தது என்பதைக் கூறுக.

9. குவான்டம் எந்திரவியலில் "அலைச்சார்பு" எந்த அளவிற்கு முக்கியம் வாய்ந்தது? அதன் பண்புகள் யாவை?

10. 'நேரத் தொடர்பற்ற ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாட்டைத் தருவித்து அதைப் (i) பெட்டியில் துகள் (ii) நேர் கோட்டுச்சீரிசை அலைவி ஆகியவற்றின் ஆற்றல் மட்டங்களைக் கணக்கிடுவதற்கு எவ்வாறு பயன்படுத்தப்பட்டிருக்கின்றது என்பதை விளக்குக.

2. தனிச் சார்புக் கொள்கை
(Special Theory of Relativity)

2·1. முன்னுரை

இயற்பியலை முறைப்படி கற்கத் தொடங்கியதிலிருந்தே நாம் 'இயக்கம்' என்றால் என்ன, 'நேரம்' என்றால் என்ன என்று ஓரளவிற்கு அறிந்திருந்தோம். கலீலியோ, நியூட்டன் முதலியோர் இவற்றைப்பற்றி ஆய்ந்திருக்கின்றனர். அதன் காரணமாக நமக்குப் "பண்டைய எந்திரவியல்" (Classical mechanics) என்ற எந்திரவியலின் பெரும்பகுதி கிடைத்திருக்கின்றது. ஆனால் 20ஆம் நூற்றாண்டின் சிறந்த விஞ்ஞானியான ஐன்ஸ்டீன், இயக்கம், நேரம் ஆகியவற்றிற்கான புதிய கொள்கைளைப் புகுத்தலாயினர். இவரின் ஆராய்ச்சி இன்றைய இயற்பியலில் ஒரு பெரும் புரட்சியையே உண்டாக்கியிருக்கிறதென்றால் அஃது மிகையாகாது. 'நேரம்', இயக்கம் இவற்றிற்கிடையேயுள்ள தொடர்பு அல்லது சார்புத்தன்மையினை விளக்க ஐன்ஸ்டீன் "சார்புக் கொள்கை" (Theory of Relativity) என்றதொரு புதுக் கொள்கையினை உண்டாக்கினர். இஃது இருவகைப்பட்டு இன்று நம்மிடையே உள்ளது. முதலாவது 'தனிச் சார்புக் கொள்கை' (Special Theory of Relativity) என்றும், இரண்டாவது பொதுச் சார்புக் கொள்கை (General Theory of Relativity) என்றும் அழைக்கப் படுகின்றன.

தனிச் சார்புக் கொள்கையின் எடுகோள்கள் (Postulates of Special Theory of Relativity)

இயக்கம், நேரம் என்பவற்றின் உண்மைப் பொருளைச் சரிவர உணர்வதற்கும், இவற்றிற்கிடையே நிலவும் தொடர்பை நன்கு அறிவதற்கும் பல சோதனைகள் நிகழ்த்தப்பட்டன. அச் சோதனைகளையொட்டி, தனிச் சார்புக் கொள்கைக்கான இரண்டு எடுகோள்களை ஐன்ஸ்டீன் வரையறுத்தார். முதலில் இந்த எடுகோள்களையும், பின்னர் அவற்றைத் தருவிக்க உதவிய சோதனைகளையும் பார்ப்போம்,

ஐன்ஸ்டீன் சார்புக் கொள்கையின் எடுகோள்கள்

1. ஒன்றுக்கொன்று சீரான நேர்ப்பெயர்ச்சி இயக்கம் கொண்ட எல்லாக் கோப்புகளுக்கும் அல்லது சட்டங்களுக்கும் (frames of references) இயற்பியல் விதிகள் யாவும் ஒன்றே யாகும்.

2. ஒரு குறிப்பிட்ட நோக்குநரைப் பொறுத்து, ஒளியின் திசைவேகம் மாறிலியாக இருக்கும். ஒளியின் திசைவேகம், ஒளி மூலத்தின் திசை வேகத்தையோ அல்லது வேறு எந்த நிபந்தனையையோ பொறுத்ததன்று.

இங்குச் 'சட்டம்' என்பது அளவீடுகள் கணிக்கப்படுகின்ற ஆயக் கட்டமாகும். இது சோதனைகள் நிகழ்த்தப்படும் சோதனைச் சாலையிலுள்ள மேசையாகவும் இருக்கலாம். அல்லது பூமிக்கு அப்பாற் சுற்றும் செயற்கைக் கோளமாகவும் இருக்கலாம். ஆனால், இச் சட்டங்கள் முடுக்கமற்றவையாக இருக்க வேண்டும். அதாவது, இச் சட்டங்களுக்கு இடையேயுள்ள சார்பு இயக்கம் ஒரு நேர்முகப் பெயர்ச்சி இயக்கமாக இருக்க வேண்டும், இச் சட்டங்களில் நியூட்டனின் முதல் இயக்க விதி உண்மையாக இருக்கும். இத்தகைய சட்டங்களை நாம் 'நிலைமச் சட்டங்கள்' (Inertial frames) அல்லது 'நிலைமக் கோப்புகள்' என்று அழைக்கலாம்.

சார்புக் கொள்கையின் முதல் எடுகோளிலிருந்து பின்வரும் உண்மையினை நாம் பெறலாம். 'முடுக்கமற்ற எந்தச் சட்டத்திலும், குறிப்பிட்ட சோதனை ஒன்றின் விளைவுகள் ஒரே மாதிரியாக இருக்கும்.' இங்குச் சோதனை என்பது ஒளியியல், மின்னியல், காந்தவியல் அல்லது இயக்கவியல் ஆகியவற்றில் நாம் செய்கிற ஏதாவது ஒரு சோதனையாக இருக்கலாம். ஆனால், எந்தச் சட்டத்தில் நாம் சோதனைகளை நிகழ்த்தி அளவீடுகளை எடுக்கின்றோமோ அந்தச் சட்டம் நிலைத்திருக்கின்றதா அல்லது இயங்கிக் கொண்டிருக்கின்றதா, அவ்வாறு இயங்கிக் கொண்டிருந்தால் அதன் திசை வேகம் என்ன என்பதை நாம் எவ்வழியிலும் கண்டறிய இயலாது.

'இயக்கம்', 'நேரம்' இவற்றை விளக்குவதற்காக, ஐன்ஸ்டீனால் கொடுக்கப்பட்ட சார்புக் கொள்கையின் உண்மைகள், பொருள்கள் ஏறத்தாழ ஒளியின் திசைவேக அளவிற்குத், திசைவேகம் கொண்டு இயங்குகின்றபோதுதான் நமக்கு நன்கு புலனாகின்றன, இதைத் தவிர, ஐன்ஸ்டீனால் தருவிக்கப்பட்ட நிறை-

ஆற்றல் சமன்பாடு, இத் தனிச் சார்புக் கொள்கையிலேதான் தருவிக்கப்பட்டது. இனி, இச் சார்புக்கொள்கையின் எடுகோள்கள் எவ் வுண்மைகளிலிருந்து தருவிக்கப்பட்டன என்பதைக் கூர்ந்து கவனிப்போம்.

2·2. ஈதர் (Ether)

அலைகளின் இயக்கத்தைப்பற்றி விஞ்ஞானிகள் ஆண்டு 1900-க்கு முன்பே அறிந்திருந்தனர். அலைகளின் இயக்கத்திற்குத் தேவையானவை (i) அதிர்வுறும் பொருள், (ii) இவ் வதிர்வு ஊடுருவிச் செல்லும் ஊடகம் ஆகியவை என்றும், இவ் வூடகங்கள் சிற்சில தன்மைகளைக் கொண்டிருக்க வேண்டும் என்றும் அவர்கள் அறிந்திருந்தனர். சுருங்கச் சொல்லின், அலையின் இயக்கத்திற்கு இவ் வூடகமே ஒரு சட்டமாக அமைகின்றது எனலாம்.

ஆண்டு 1900-க்கு முன்னரே ஒளியின் திசைவேகம் பல சோதனைகளின் மூலம் நிர்ணயிக்கப்பட்டுவிட்டது. இது 'c' என்ற எழுத்தால் குறிக்கப்படுகின்றது. 'c' ன் மதிப்பு 3×10^8 மீட்டர்கள்/வினாடி ஆகும். ஒளியானது மின் காந்தத் தன்மை வாய்ந்த அலைகள் என்றும், ஓரிடத்திலிருந்து மற்றோரிடத்திற்கு அது குறிப்பிட்ட ஊடகத்தின் வழியாக மேற்கண்ட திசை வேகத்தோடு செல்கிறது என்றும் நாம் பல சோதனைகளின் வாயிலாக அறியலாம். ஆனால், இந்த ஊடகம் எத் தன்மையது என்பது அறியப்படவில்லை.

இந்த ஊடகத்தை விஞ்ஞானிகள் ஈதர் (ether) என்றழைத்தனர். இது கோள்களுக்கிடையேயுள்ள எல்லா வெளிகளிலும் பரவியிருக்கிறதென்றும், ஒளியைத் தன்னூடே, அதிக திசை வேகத்துடன் பாயவிட வல்லது என்றும் கொண்டனர். மேலும், இதை ஒளியின் திசை வேகம் கணிக்கப் பயன்படும் ஒரு குறிப்புச் சட்டமாகவும் (frame of reference) கொண்டனர். கோள்களின் இயக்கங்களில் எவ்வித உராய்வும் ஏற்படுவதில்லையாகையால் இவ் வியக்கங்களை ஈதர் எந்த விதத்திலும் தடைசெய்வதில்லை என்றும் கொண்டார்கள்.

உண்மையில் ஈதர் என்ற ஒரு ஊடகம் இருந்தால் அது சோதனைமூலம் உண்மையாக்கப்பட வேண்டும். மேலும் அஃது எத் தன்மையது என்பதும் கண்டுபிடிக்கப்படவேண்டும். அவ்வாறு ஈதரின் தன்மைகளைக் கண்டுபிடிக்க நிகழ்த்தப்பட்ட

பல சோதனைகளில் மிக முக்கியத்துவம் வாய்ந்தது மைக்கல்சன், மார்லி (Michaelson, Morley) என்ற இரு விஞ்ஞானிகள் நிகழ்த்திய சோதனையே. இது சார்புக் கொள்கைக்கே அடிப் படையான சோதனையாக இருந்தது என்று கூறுவது மிகை யாகாது. இதனைப் பற்றிப் பின்னர்ப் படிப்போம்.

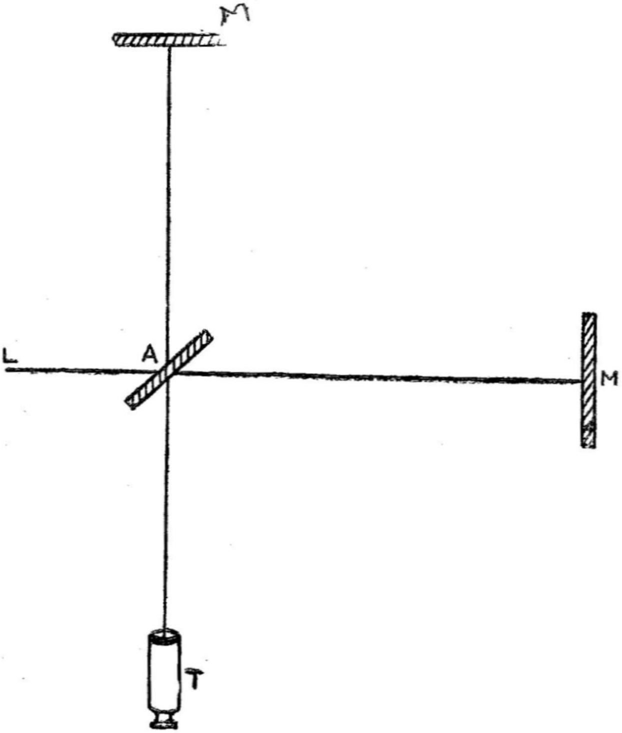
நாம் ஆறு ஒன்றில் படகில் செல்வதாக வைத்துக் கொள்வோம். நாம் செல்லும் படகு ஆற்றில் எந்தத் திசை வேகத்தோடு செல்கிறது என்பதை எளிதில் நாம் அறிந்து கொள்ளலாம். அவ்வாறே பூமியானது ஈதரின் ஊடே செல்கிற தென்று கொண்டால் ஈதரைப்பொருத்துப் பூமி எந்தத் திசை வேகத்தோடு இயங்கிறதென்பதைக் கண்டறிந்துகொள்ளலாம். இந்தச் சார்புத் திசைவேகத்தைதான் மைக்கல்சனும், மார்லியும் நிகழ்த்திய சோதனை அறிய முற்பட்டது. ஆனால், பூமியோடு ஈதரும் சேர்ந்து இயங்கமுடியாது என்பது, வானியல் ஆராய்ச் சிகளின் மூலம் நாம் கண்டறிந்த உண்மை ஆகும்.

பூமியும் மற்றக் கோள்களும் இயங்குகின்ற பொழுது, அவை தம்மோடு ஈதரையும் அரவணைத்துச் செல்கின்றன என்று கொண்டால் வெளியின் (space) ஏதாவது ஒரு பகுதியில் அதிக அளவு சறுக்குப் பெயர்ச்சி (shear) ஏற்படக்கூடும். இச் சறுக்குப் பெயர்ச்சியின் காரணமாக மிகத் தொலைவிலுள்ள விண்மீன்களிலிருந்து வருகின்ற ஒளியானது இந்தப் பகுதிகளில் ஓரளவு விலக்கமடையும். இவ் விலக்கத்தை வானிலைச் சோதனைகளினின்றும் அறிந்துகொள்ளலாம். இவ் விலக்கத்தை அறிவதன்பொருட்டு நிகழ்த்தப்பட்ட சோதனைகளின்றும் ஒளி விலக்கம் பெறவில்லை என அறியப்பட்டது. எனவே, பூமி அல்லது மற்றக் கோள்களோடு ஒருங்கு சேர்ந்து ஈதரும் இயங்கவில்லை என்பது பெறப்பட்டது. நிலையான ஈதரின் ஊடே பூமியானது எந்தத் திசை வேகத்தோடு செல் கின்றது என்பதை அறிய மைக்கல்சனும் மார்லியும் நடத்திய சோதனையைக் கீழே காண்போம்.

2·3. மைக்கல்சன் - மார்லி சோதனை (Michelson Morley Experiment)

இச் சோதனை ஒளியின் பண்புகளில் ஒன்றான "குறுக் கீட்டு விளைவை" (interference) அடிப்படையாகக் கொண்டு நிகழ்த்தப்பட்டதாகும். ஒளிக்கற்றை ஒன்றை இரு பகுதிகளாகப் பிரித்து, அவை சிறு தொலைவு சென்ற பின்னர் அவற்றை ஒன்று சேர்த்தால் குறுக்கீட்டு விளைவு ஏற்படும் என்பது நமக்குத்

தெரிந்ததே. இரு பகுதிகளில் ஏதேனும் ஒன்று அதிகத் திசை வேகத்துடன் பரவுமானால், அவற்றிற்கிடையே பாதை வேறுபாடு ஏற்படும். இப் பாதை வேறுபாட்டை ஒட்டித் திரையில் ஒளிப் பட்டையோ அல்லது இருள் பட்டையோ தோன்றும். ஒளியின் இத்தகைய குறுக்கீட்டு விளைவை அடிப்படையாகக் கொண்டு நிறுவப்பட்ட குறுக்கீட்டு விளைவு மானி (Interferometer)

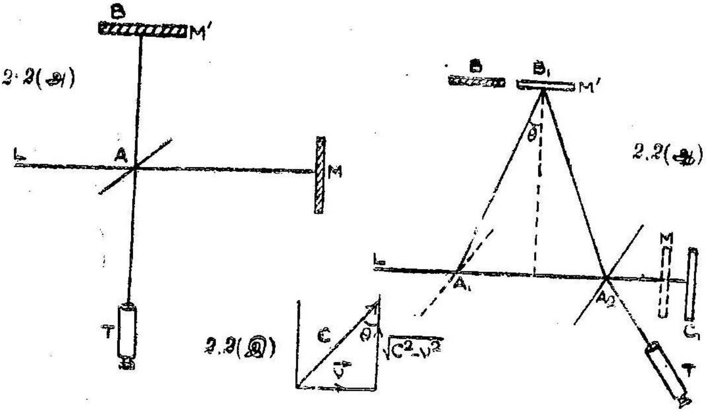


படம் 2·1 : மைக்கல்சனின் குறுக்கீட்டு விளைவுமானி

ஒன்றைத்தான் மைக்கல்சனும், மார்லியும் தங்கள் சோதனையில் பயன்படுத்தினர். இது படம் (2—1)-ல் காட்டப்பட்டுள்ளது. இங்கு *L* என்பது ஓர் ஒளி மூலம் (Source of light). *T* என்பது தொலை நோக்கி (Telescope). '*A*' என்பது பாதியளவு பாதரசம் பூசப்பட்ட ஓர் ஆடி. *M*, *M'* ஆகியவை இரண்டு ஆடிகள். இவை ஒளி பாயும் திசைக்குச் செங்குத்தாக அமைக்கப்பட்டுள்ளன.

T என்ற தொலைநோக்கியின் வழியே நோக்கினால் நமக்கு ஒளி வரிகளும் இருள் வரிகளும் தெரியும். இவ் வரிகள் ஒளியின் குறுக்கீட்டு விளைவினால் ஏற்படுகின்றன. ஒளி அலைகளின் பாதை வேறுபாடு அரை அலை நீளத்தின் இரட்டைப்படை எண் பெருக்கலாக இருந்தால் தொலை நோக்கியில் ஒளி வரிகளும், ஒற்றைப் படை இருப்பின் இருள் வரிகளும் கிடைக்கும். படம் (2.2)-ல் இவ் விரு வகைகளும் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளன.

படம் 2.2 (அ)-ல் ஈதருக்கும் குறுக்கீட்டு விளைவுமானிக்கும் இடையே சார்பியக்கம் இல்லாமலும், 2.2(ஆ)-ல் குறுக்கீட்டு விளைவுமானியானது ஈதரின் ஊடே, *LAM*-க்கு இணையாக, '*V*' திசை வேகத்தோடு செல்வதாகவும் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது.



படம் 2·2. குறுக்கீட்டு-விளைவு-மானி அமைதி நிலையிலிருப்பதற்கும் இயங்கிக்கொண்டிருப்பதற்கும் ஒப்புமை
(அ) அமைதி நிலை
(ஆ) இயக்கம்
(இ) ஆய்கருவியின் திசைவேக வெக்டர் முக்கோணம்.

வெளியில் பரவியிருக்கிற நிலையான ஈதரில் ஒளியானது '*C*' என்ற திசை வேகத்தோடு பரவுகின்றதெனவும், ஈதரில் பூமியானது '*V*' என்ற திசை வேகத்துடன் இயங்குகிறதெனவும் கொள்வோம். *M*, *M'* என்ற ஆடிகள் முறையே *B*, *C* என்ற இரண்டு புள்ளிகளில் படத்தில் காண்பிக்கப்பட்டிருக்கின்றன. எனவே, $AB = AC = l$ எனக் கொள்வோம். *A*-யிலிருந்து *M*-க்குச் சென்று எதிரொளிப்புப் பெற்று மறுபடியும் *A*-ஐ வந்தடைய ஒளி எடுத்துக்கொள்ளும் நேரம் $2l/c$ வினாடிகள். இதுபோன்றே

ஒளியானது M'-க்குச் சென்று எதிரொளிப்புப் பெற்று மறுபடியும் A-க்கு வருவதற்கு $2l/c$ விநாடிகள் எடுத்துக்கொள்கின்றது. எனவே, தொலை நோக்கியின் மையப் புள்ளியில் இவையிரண்டும் ஒன்றோடொன்று சேர்ந்து குறுக்கீட்டு விளைவை உண்டாக்கும்.

ஆனால், படம் 2.2(ஆ)-ல் காட்டியிருப்பதுபோல், குறுக்கீட்டு மானி ஈதரில் இயங்கிக்கொண்டிருக்குமானால், ஒளியானது A-லிருந்து M-க்குச் செல்வதற்கு $l/c\text{-}v$ விநாடிகளையும், திரும்பி A-க்கு வருவதற்கு $l/c+v$ விநாடிகளையும் எடுத்துக்கொள்கிறது. எனவே ஒளியானது A-யிலிருந்து M-க்குச் சென்று எதிரொளிப்பு அடைந்து மறுபடியும் A-யை வந்தடைய எடுத்துக்கொள்ளும் மொத்த நேரம்.

$$t = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{c+v} = \frac{2l\,c}{c^2-v^2} \quad \ldots \quad (2.1)$$

இப்பொழுது ஒளி A-யிலிருந்து M'-க்குச் சென்று எதிரொளிப்பு அடைந்து திரும்பி A-யை வந்தடைய எடுத்துக்கொள்ளும் நேரத்தைக் கவனமாகக் கணக்கிடுதல்வேண்டும். படம் 2·2-ல் ஒளியானது A-லிருந்து சென்று M'ஐ அடைந்து எதிரொளித்து மறுபடியும் A-க்கு வருவதற்கு எடுத்துக்கொள்ளும் நேரத்தை

$$t' = \frac{d}{c} = \frac{2l}{\cos\theta} \cdot \frac{1}{c}$$

என்று எழுதலாம்.

இங்கு $d = 2A_1B_1 = 2l/\cos\theta$. இப்பொழுது t'-ன் மதிப்பைக் கண்டுபிடித்ததற்கு, θ-வின் மதிப்பைக் கண்டுபிடித்தல் அவசியம். இதைப் படம் 2·2 (இ)-ல் காட்டப்பட்டிருக்கும் திசை வேக வெக்டர் முக்கோணத்தின்றும் கணக்கிடலாம். இதன்படி ஈதரைப் பொறுத்து ஒளி செல்லும் திசைவேக வெக்டர் $\overrightarrow{V}$-க்கும், ஆய்கருவியை ஒட்டி ஒளி செல்லும் திசைவேக வெக்டர் $\overrightarrow{V_{ca}}$-க்கும் ஆன வெக்டர் கூட்டுத் தொகைக்கும் சமமாக இருக்கும். இப்படத்தில் θ என்ற கோணத்தை

$$\cos\theta = \sqrt{\frac{c^2-v^2}{c^2}}$$

என்ற சமன்பாட்டிலிருந்து பெறலாம். எனவே,

$$t' = \frac{2l}{c\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad \ldots \quad (2.2)$$

என்றுகிறது.

சமன்பாடுகள் (2.1), (2.2) ஆகியவற்றிலிருந்து t', t என்ற இரண்டு நேர அளவுகளும் ஒன்றுக்கொன்று மாறுபட்டிருக்கின்றன என அறியலாம். எனவே, இப்பொழுது தொலைநோக்கியின் மையத்தில் இசைவுக் குறுக்கீட்டு விளைவு ஏற்படாது என்பது திண்ணம்.

இவ் விரு ஒளிக்கற்றைகளுக்கிடையேயுள்ள "கட்ட வேறுபாட்டைச் (phase difference) சமன்பாடுகள் (2.1), (2.2)-ன் பைனுமியல் தேற்றத்தைக் (Binomial theorem) கொண்டு விரித்துப் பெறலாம். இங்கு $V<<C$. எனவே

$$t = \frac{2l}{c}\left(1+\frac{v^2}{c^2}+\frac{v^4}{c^4}+\ldots\right)^{\frac{1}{2}} \qquad \ldots (2.3)$$

$$t' = \frac{2l}{c}\left(1+\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}+\frac{3}{8}\frac{v^4}{c^4}+\ldots\right) \qquad \ldots (2.4)$$

இவற்றிற்கிடையேயுள்ள வேறுபாட்டை 'Δt' என்று கொள்வோமானல்,

$$\Delta t = t-t' = \frac{2l}{c}\left(\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}+\frac{5}{8}\frac{v^4}{c^4}+\ldots\right) \qquad \ldots (2.5)$$

$$= \frac{2l}{c}\cdot\frac{1}{2}\cdot\frac{v^2}{c^2} = \frac{lv^2}{c^3}$$

எனத் தோராயமாக எழுதலாம். எனவே,

$$\Delta t = \frac{lv^2}{c^3} \qquad \ldots (2.6)$$

இப்பொழுது ζ என்பதை ஒளியின் அலைவு நேரமாகக் கொண்டால்,

$$\frac{\Delta t}{\zeta} = \frac{2l}{\zeta c}\cdot\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} \qquad \ldots (2.7)$$

என்பது கிடைக்கும். இது ζ வின் ஒரு பின்னமாகும். எனவே இது ஒளியின் அலை நீளத்தின் ஒரு பின்னமாகிறது. நாம் தொலைநோக்கி வழியே பார்க்கின்றபொழுது ஒளிப்பட்டையானது ஒளியின் அலை நீளத்தின் ஒரு சிறிய பின்னப்பகுதி அளவிற்கு நகரும். இப்பொழுது நாம் குறுக்கீட்டு விளைவுமானியின் கால்களை 90 பாகை அளவிற்கு நகர்த்தினல் மேற்கண்ட பட்டை நகர்வு எதிர்த்திசையில் ஏற்படும். எனவே, நாம்

$$\Delta f = \frac{2l}{\lambda} \frac{v^2}{c^2} \qquad \ldots \quad (2.8)$$

என்ற அளவுள்ள பட்டை நகர்வை எதிர்பார்க்கலாம். எப்போதாவது பூமிக்கும் ஈதருக்குமிடையே சார்புத்திசை வேகம் சுழியாக இருக்கக்கூடும். ஆனால் 12 மணி நேரத்தில் பூமியின் இயக்கம் திசை மாறுபாடு அடைகிறது. 6 மாதங்களில் பூமியின் வளைவுப்பாதை இயக்கமும் திசைமாறுபாடு அடைகிறது. மைக்கல்சன் பயன்படுத்திய $l \approx 11$ மீட்டர்கள், $\lambda = 5{\cdot}9 \times 10^{-7}$ மீட்டர்கள், சுற்றுப்பாதையில் பூமியின் திசை வேகம் $V \approx 3 \times 10^4$ மீட்டர்/விநாடி. எனவே சமன்பாடு (2.8)-ன் படி ஒரு குறிப்பிட்ட காலத்தில் 0·37 பட்டை நகர்வும், ஆறு மாதங்கள் கழித்து அதே அளவுள்ள பட்டை நகர்வும் நிகழவேண்டுமென்றும் முடிவு செய்யலாம். இம் முடிவைச் சோதனைமூலம் உண்மைப்படுத்த வேண்டி, மைக்கல்சன்-மார்லி சோதனை உருவாகியது. ஆனால் அவர்கள் சோதனையிலும், அதன்பின் நிகழ்த்தப் பெற்ற பல்வேறு சோதனைகளிலும், ஒருவித பட்டை நகர்வும் நிகழவில்லை என்பது தெரியவந்தது.

இச் சோதனையிலிருந்து நிலையான ஈதரைச் சார்ந்த எந்த வகை இயக்கத்தையும் நம்மால் அளக்க முடியாது என்பதை அறிகிறோம். இது போன்ற வேறு பல சோதனைகளால், சோதனைகள் நிகழ்த்தப்படும் சட்டத்தின் மாறாத திசை வேகங்களை அளக்க இயலும் என்பதும் தெளிவாகின்றது. இவ் விரு உண்மைகளை அடிப்படையாகக் கொண்டே ஐன்ஸ்டீன், தனிசார்புக் கொள்கையின் அச்சாணியென விளங்கும் இரண்டு எடுகோள்களைக் கொடுத்தார். தவிரவும், ஐன்ஸ்டீனின் இரண்டாவது எடுகோள், மைக்கல்சன்-மார்லி சோதனையின் முடிவுகளை நேரடியாகக் கொடுக்கிறது என்பதையுங் காணலாம்.

ஐன்ஸ்டீனின் எடுகோள்களெல்லாம் சோதனைகளின்றும் பெறப்பட்டவையே. இதுவரை நாம், ஒளியானது வெவ்வேறு திசை வேகங்களைக் கொண்டு வெளியிடைப் பரவுகிறது என்று நினைத்திருந்தோம். ஆனால், இந்த எடுகோள்களின் மூலம் ஒளியானது வெளியிடை (Space) ஒரு மாறாத திசை வேகத்தோடு தான் செல்கிறதென்றும், ஈதர் என்ற ஊடகம் வெளியிடைப் பரவியிருக்கவில்லை என்றும், அண்டத்தில் (universe) தனித்து நிலவும் ஆயக்கட்டம் எதுவுமில்லை என்றும் நாம் அறிகிறோம்.

எடுத்துக்காட்டு—1

மைக்கல்சன்-மார்லி சோதனையில், நேர்க்குத்துத் திசைகளிலிருக்கும் இரண்டு பாதைகளின் நீளம் 7 மீட்டர். குறுக்கீட்டு

விளைவு ஏற்படுவதற்காக 7000 A° அலை நீளமுடைய ஒளிச் சோதியைப் பயன்படுத்தினுல், சோதனையில் ஏற்படும் பட்டை நகர்வு எந்த அளவிற்கு இருக்கும்?

$$V = 3 \times 10^4 \ m/sec.$$

$$c = 3 \times 10^8 \ m/sec.$$

$$\lambda = 7.0 \times 10^{-7} \ m.$$

$$l = 7m.$$

$$\Delta f = \frac{2l}{\lambda} \cdot \frac{V^2}{c^2} = \frac{2 \times 7}{7 \cdot 0 \times 10^{-7}} \times \frac{(3 \times 10^4)^2}{(3 \times 10^8)^2}$$

$$= 0.20$$

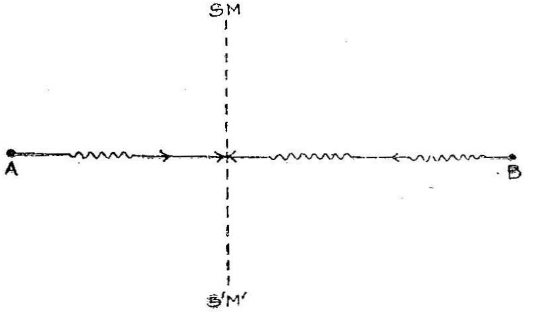
2·4. தனிச் சார்புக் கொள்கையின் எடுகோளிலிருந்து பெறப் படும் சில முடிவுகள்

நியூட்டன் தன் "இயக்க விதிகளை"த் தருவித்தபோது இரு நிகழ்ச்சிகள் "ஒரே காலத்தில்" உடன் நிகழக்கூடும் என்பது பற்றிக் கவலைப்பட்டாரில்லை. அவர் ஒரே காலத்தில் இரு நிகழ்ச் சிகள் நிகழக்கூடும் என உறுதியுடனிருந்தார். ஆனுல் ஐன்ஸ் டீனின் இரண்டாம் எடுகோள் "காலம்" என்பதை சரிவர வரை யறுத்து உண்மையை எடுத்துக் காட்டியது. ஒளி, மாருத திசை வேகங்கொண்டு, இயங்குகிறதென்ருல், இரு வினைகள் உடன் நிகழ முடியுமா என்று ஐயுற வேண்டியிருக்கிறது. குறிப்பிட்ட இரு நிகழ்ச்சிகள் ஒரே இடத்தில் நிகழ நேர்ந்தால், அவை உடன் நிகழ்கின்றனவா என்பதை எளிதில் தெரிந்துகொள்ளலாம். ஆனுல், அந் நிகழ்ச்சிகள், இயங்கிக்கொண்டிருக்கிற இரண்டு வேறு வேறு இடங்களில் நிகழுமாயின் அவை உடன் நிகழ்கின் றனவா என்பதை எளிதில் முடிவுசெய்ய இயலாது.

காட்டாக s, s' என்ற இரு ஆயக்கட்டங்களை எடுத்துக்கொள் வோம். s' என்ற ஆயக் கட்டத்தில் A', B' என்ற இரண்டு இடங் களில் இரண்டு நிகழ்ச்சிகள் உடன் நிகழ்கின்றன எனக் கொள் வோம்.

இப்பொழுது s ஆயக்கட்டமும், s' ஆயக்கட்டமும் ஒன்றுக் கொன்று நிலையாக (rest) இருந்தால், s, s' இவற்றில் நிகழும் இரு நிகழ்ச்சிகளும் உடன் நிகழ்ந்ததாகக் கொள்ளலாம். இதை உண்மையாக்குதற்கு, நிகழ்ச்சிகள் நடந்த அதே நேரத்தில் இரண்டு ஒளித் தெறிப்புகளை s, s' என்ற ஆயக்கட்டங்களிலிருந்து

அனுப்புவோம். படம் (2·3)-ல் காட்டியிருப்பதுபோல் AB-யின் மையப்புள்ளியான M ல் இரண்டு தெறிப்புகளும் ஒரே நேரத்தில் வந்து சேர்ந்தால், மேற்கூறிய நிகழ்ச்சிகள் இரண்டும் ஒரே

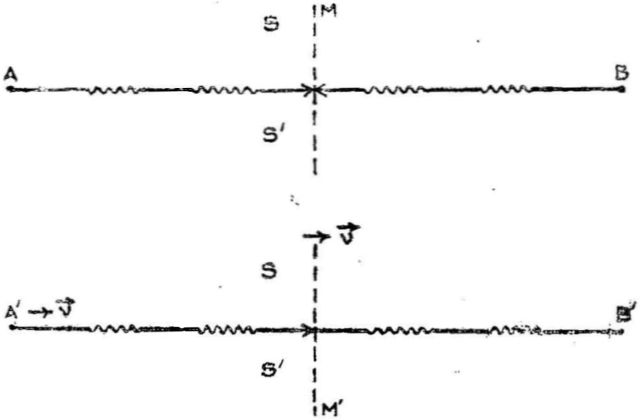


படம் 2·3. ஒன்றிற்கொன்று அமைதி நிலையில் இருக்கும் இரண்டு ஆயக்கட்டங்களில் "ஒருங்கு நிகழ்வு"

நேரத்தில் நிகழ்ந்ததெனக் கொள்ளலாம், A' B'-ன் மையப்புள்ளியான M'-ம் உடன் சேர்ந்தால் s, s' ஆகிய ஆயக்கட்டங்களில் இரு நிகழ்ச்சிகளும் ஒரே காலத்தில் நிகழ்ந்தன எனக் கொள்ளலாம். இது படம் 2-3-ல் காட்டப்பட்டிருக்கிறது.

ஆனல் s' ஆயக்கட்டமானது s-ஐப் பொறுத்து 'V' என்ற திசை வேகத்தோடு இயங்கிக்கொண்டிருந்தால், மேற்கூறிய இரண்டு நிகழ்ச்சிகளும் s, s'-ஐப் பொறுத்து உடன் நிகழ்ந்தவைகளாகக் கருத முடியாது. இரு நிகழ்ச்சிகளும் s-ஆயக்கட்டத்தில் படத்தில் காட்டியிருப்பதுபோல் உடன் நிகழ்ந்தனவாகக் கொள்வோம். s-ன் ஒளித் தெறிப்புகள் M-ல் வந்து சேர்கின்ற பொழுது, s'-ன் ஒளித்தெறிப்பு M'-ஐ வந்து சேராது. எனவே B'-ல் நடந்த நிகழ்ச்சி, A–ல் நிகழ்ந்ததை விட முன்னரே நிகழ்ந்திருக்க வேண்டும். s ஆயக் கட்டத்தைப் பொறுத்தவரையில் M'- ஐ ஒரே நேரத்தில் வந்தடைகிறபடி இரு நிகழ்ச்சிகளும் நடைபெறுகின்றன என்று வைத்துக்கொண்டால், s'-ல் இரு நிகழ்ச்சிகளும் உடன் நிகழ்தனவாகக் கொள்ளலாம். ஒளித் தெறிப்புகள் M-ஐ இரண்டு வேறு காலங்களில் கடந்திருக்கும். A-யிலிருந்து புறப்பட்ட ஒளிச் சைகை, B–லிருந்து புறப்பட்ட சைகையைவிட முன்கூட்டியே M-ஐக் கடந்திருக்கும். எனவே s-ல் இருக்கும் நோக்குநர் ஒருவர் A-யில் நடந்த நிகழ்ச்சி B-யில் நடந்ததைவிட முன் கூட்டியே நடந்திருக்க வேண்டும் என்று முடிவு செய்வார்.

மேற்கண்டவற்றினின்று, ஒன்றுக்கொன்று சார்பாக இயங்கிக் கொண்டிருக்கும் இரண்டு கட்டங்களிலுள்ள 'இடம்', 'காலம்' ஆகியவற்றைப் பண்டைய கொள்கைகளைக்கொண்டு விளக்க முடியாது என்பது நன்கு விளங்குகின்றது. எனவே, ஒன்றுக் கொன்று சார்புத்திசை வேகத்தோடு இயங்குகின்ற இரண்டு கட்டங்களில் "உடன்நிகழ்வு" (simultaneity) இருக்கமுடியாது என்பதும் தெரிகின்றது.



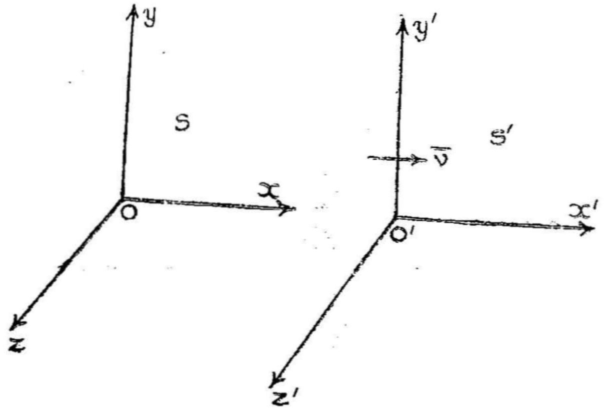
படம் 2·4.
ஒன்றிற்கொன்று சார்புத் திசைவேகத்தோடு இயங்குகிற இரண்டு கட்டங்களில் உடன்நிகழ்வு ஏற்படாது என்பதைக் காண்பித்தல்.

2·5. லாரன்ட்ஸ் படிமாற்றுச் சமன்பாடுகள் (Lorentz Transformation equations)

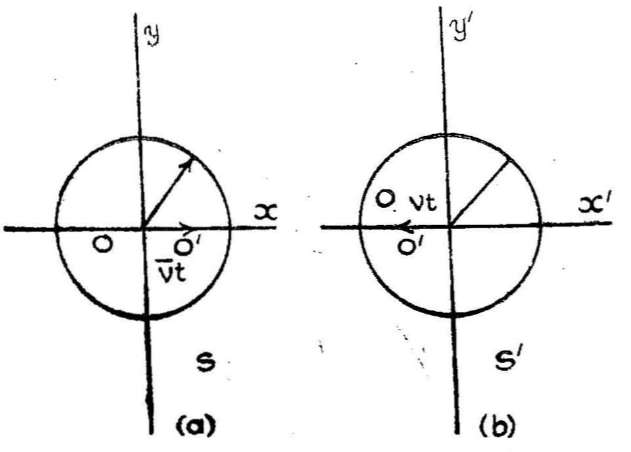
சீரான சார்புத் திசை வேகங்களோடு இயங்கிக்கொண்டிருக்கும் இரு சட்டங்களை இணைக்கும் படிமாற்றங்களை இப்போது கவனிப்போம். S, S' என்ற இரு சட்டங்களில் இரு நோக்குநர்கள் உள்ளனர் எனவும், சட்டங்களின் x, x' அச்சுகள் ஒரே நேர் கோட்டில் அமைந்திருக்கின்றன எனவும், y, y' அச்சுகளும், z, z' அச்சுகளும் ஒன்றுக்கொன்று இணையாகப் படத்தில் காட்டிய வண்ணம் அமைந்திருக்கின்றன எனவும் கொள்வோம். x', y', z', என்ற சட்டம், OO' என்ற திசையில் 'V' என்ற மாறுத திசை வேகத்துடன் வலப்பக்கத்தில் இயங்குவதாகவும் கொள்வோம்.

முதலில் $x'y'z'$ சட்டம், xyz சட்டத்திற்கு வலப்பக்கத்தில் இருப்பதாகக் கொண்டு, O என்ற அச்சுப் புள்ளியும், O' என்ற

அச்சுப் புள்ளியும் ஒன்றுசேர்ந்திருக்கும்போது ஒளித்தெறிப்பு ஒன்று உண்டாவதாகக் கொள்வோம். இந் நேரத்தில் நேரத்தை



படம் 2·5.
லாரன்ட்ஸ் படிமாற்றச் சமன்பாடுகளைத் தருவிப்பதற்கான இரண்டு ஆயக்கட்டங்கள்



படம் 2·6.
ஒன்றிற்கொன்று சார்புத் திசைவேகங்களில் இயங்கிக்கொண்டிருக்கிற இரு ஆய கட்டங்களில் ஓர் ஒளிப்படலம் பரவுதல்

அளக்கும் கடிகாரங்களும் சுழியைக் காண்பிக்குமாறு மாற்றி வைத்துக்கொள்வோம். இப்போது $t = t' = 0$ ஆகும். ஒளியின் திசைவேகம் $= c$. S ஆயக் கட்டத்தில் ஒளியானது 'r' ஆரமுள்ள

ஒரு கோள அளவிற்குப் பரவுகின்றது. இங்கு $r=(x^2+y^2+z^2)^{\frac{1}{2}}$. இதை

$$x^2+y^2+z^2 = c^2\ t^2 \qquad \dots \quad (2{\cdot}9)$$

என்ற சமன்பாடு விளக்குகிறது. s^1 ஆயக் கட்டத்திலும் இவ்வாறே,

$$x'^2+y'^2+z'^2 = c^2\ t'^2 \qquad \dots \quad (2{\cdot}10)$$

என்ற சமன்பாடும் பெறப்படும். இது படம் (2·6)-ல் விளக்கப் பட்டிருக்கிறது.

இங்கு x-y சமதளந்தான் காட்டப்பட்டிருக்கிறது. இது ஒளி யின் கோள அலைமுகப் பரப்பையும், xy சமதளத்தையும் கொண்ட ஒரு வெட்டுப் பரப்பு. கலிலியோவின் படிமாற்றச் சமன்பாடுகள் கொண்டு, சமன்பாடுகள் (2·9) (2·10) ஆகியவற்றிற்கு விளக்கம் காண முடியாது. கலிலியோவின் சமன்பாடுகள் கீழே கொடுக்கப் பட்டுள்ளன.

$$\begin{aligned} x^1 &= x - vt. & x &= x^1+vt \\ y^1 &= y & y &= y^1 \\ z^1 &= z & z &= z^1, \\ t^1 &= t & t &= t^1 \end{aligned} \qquad \dots \quad (2{\cdot}11)$$

சமன்பாடுகள் (2·11)-ஐச் சமன்பாடு (2·9)-ல் சரியீடு செய்தால் (2·10) ஆம் சமன்பாடு கிடைக்காது. இதைப் போன்றே (2·11) ஆம் சமன்பாடுகளை (2 10)-ல் சரியீடு செய்தால் சமன்பாடு (2·9) கிடைக்காது.

எனவே, தனிச் சார்புக் கொள்கை எடுகோள்களின் உண்மையைக் கண்டறிய, கலிலியோவின் படிமாற்றச் சமன்பாடு களைத் தவிர்த்து வேறு படிமாற்றச் சமன்பாடுகளைப் பயன்படுத்த வேண்டும். s, s^1 என்ற இரு ஆயக் கட்டங்களிலும், y-ன் மதிப்பும், z-ன் மதிப்பும் y', z' ஆகியவற்றிற்குச் சமமாக இருப்பதால், x, t, x^1, t^1 இவற்றிற்கிடையே உள்ள சமன்பாடுகள் நேர் கோட் டுச் சமன்பாடுகளாகத்தான் (Liner Equations) இருக்கமுடியும். ஏனெனில், இவை இரண்டு அல்லது பல அடுக்குச் சமன்பாடு களாக இருப்பின், இவற்றின் மதிப்புகள் இரண்டுக்கு மேற்பட்ட னவாக இருக்கும். எனவே, மேற்கூறிய நேர்க்கோட்டுச் சமன் பாடுகளைக் கீழ்க்கண்டவாறு வைத்துக்கொள்வோம்.

$$x' = ax+bt$$
$$t' = ex+ft \qquad \ldots \quad (2{\cdot}12)$$

இங்கு a, b, e, f என்பவை மாறிலிகள். இப்பொழுது நாம் இம் மாறிலிகளின் மதிப்பினைக் கண்டறிய வேண்டும். 'V'-ன் சிறு மதிப்புகளுக்கு இச் சமன்பாடுகள் கலிலியோவின் சமன் பாடுகளுக்குச் சரியாக அமையும் என்று கொண்டோமானால், மேற்கண்ட மாறிலிகளின் தருவிப்பு மிக எளிதாகிவிடும் x'-ஐ,

$$x' = \lambda\,(x-vt) \qquad \ldots \quad (2{\cdot}13\text{அ})$$

என்று எழுதலாம். இங்கு λ என்பது மற்றொரு மாறிலி. இம் மாறிலி V-யையும் C-யையும் ஒட்டியதாக இருக்கலாம். ஆனால், இது x-யும் t-யும் பொறுத்திருக்காது. சீரான சார்புத்திசை வேகங்களைக் கொண்ட இரண்டு ஆயக்கட்டங்கள் ஒன்றுக்கொன்று சமமான தால் x'-ஐ ஒட்டி, x-க்கான படிமாற்றச் சமன்பாடும் V-ன் குறி மாறுவதைத் தவிர மற்ற வகைகளில் ஒரே மாதிரியாக அமையும். அதாவது

$$x = \lambda\,(x'+vt') \qquad \ldots \quad (2{\cdot}13\text{ஆ})$$

சமன்பாடு $(2{\cdot}13$ அ$)$-ஐச் சமன்பாடு $(2{\cdot}13$ அ$)$-ல் சரியீடு செய்தால்,

$$t' = \left(\frac{1}{\lambda}-\lambda\right)\frac{x}{v} + \lambda\, t \qquad \ldots \quad (2{\cdot}14)$$

அல்லது

$$t = \left(\lambda-\frac{1}{\lambda}\right)\frac{x'}{v} + \lambda t' \qquad \ldots \quad (2{\cdot}15)$$

என்று கிடைக்கும்.

இப்போது $(2{\cdot}9)$ $(2{\cdot}10)$ என்ற சமன்பாடுகள் ஒரே அலை முகப்பின் பரவுதலைக் குறிக்கின்றன. இவற்றில் ஏதாவது ஒரு சமன்பாட்டிலிருந்து தொடங்கி, மற்றச் சமன்பாட்டினைப் படி. மாற்றங்களின் மூலம் பெறமுடியும். சமன்பாடுகள் $(2{\cdot}13$ஆ$)$ $(2{\cdot}14)$, $y' = y$, $z' = z$ ஆகியவற்றைச் சமன்பாடு $(2{\cdot}10)$-ல் சரியீடு செய்தால்,

$$x^2\left[\lambda^2-\frac{c^2}{v^2}\left(\frac{1}{\lambda}-\lambda\right)^2\right]-2xt\left[v\lambda^2+\frac{c\lambda^2}{v}\left(\frac{1}{\lambda}-\lambda\right)\right]$$
$$+y^2+z^2 = c^2\,t^2\left(\lambda^2-\frac{v^2}{c^2}\lambda^2\right) \qquad \ldots \quad (2{\cdot}16)$$

என்பது கிடைக்கும். மேற்கண்ட சமன்பாட்டுடன் (2·9) ஆம் சமன்பாட்டை ஒப்பிட்டால்,

$$\lambda^2 - \frac{c^2}{v^2}\left(\frac{1}{\lambda} - \lambda\right)^2 = 1 \qquad \ldots \quad (2\cdot17)$$

$$V\lambda^2 + \frac{c^2}{v^2} \cdot \lambda\left(\frac{1}{\lambda} - \lambda\right) = 0 \qquad \ldots \quad (2\cdot18)$$

$$\lambda^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = 1 \qquad \ldots \quad (2\cdot19)$$

என்பன கிடைக்கும். இப்பொழுது λ-வின் மதிப்பு

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad \ldots \quad (2,20)$$

இதை

$$\lambda = \sqrt{\frac{1}{1-\beta^2}} \qquad \ldots \quad (2\cdot20அ)$$

என்று எழுதலாம்.

இங்கு $\beta = v/c$. 2·12-ஆம் சமன்பாட்டினைப் பயன்படுத்தி இதினின்றும் லாரன்ட்ஸின் படிமாற்றச் சமன்பாடுகளைப் பெறலாம். அவையாவன :

$$\left.\begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1-\beta^2}} \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}} \end{aligned}\right\} \qquad \ldots \quad (2\cdot21)$$

இதைப்போன்றே, x, y, z, t-களுக்கான சமன்பாடுகளையும் பெறலாம்.

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{x' + vt}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad & z &= z' \\ y &= y' & t &= \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}} \end{aligned}\right\} \qquad \ldots \quad (2\cdot22)$$

தனிச் சார்புக் கொள்கையின்படி வெளியையும், காலத்தையும் (Space and time) இணைத்து, ஓர் ஆயக்கட்டத்திலிருந்து அதைப் பொறுத்துச் சீரான திசை வேகத்தில் சென்றுகொண்டிருக்கும் மற்றொரு ஆயக் கட்டத்திற்கான படிமாற்றச் சமன்பாடுகள் (2·21), (2·22)ஆம் சமன்பாடுகளால் குறிக்கப்படுகின்றன. இவற்றில் x, y, z, t ஆகியவை தெரியுமானால் x', y', z', t' ஆகியவற்றைக் கண்டுபிடிக்கலாம்.

2·6 லாரன்ட்ஸ் - ஃபிட்ஸ் ஜெரால்டு நீளக் குறுக்கம் (Lorentz - Fitsgerald Contraction)

ஒன்றுக்கொன்று 'v' சார்புத் திசை வேகத்தில் இயங்கிக் கொண்டிருக்கின்ற இரண்டு ஆயக்கட்டங்களில், ஓர் அளவு கோலின் நீளம் எவ்வாறு அமைகின்றது என இங்குக் காண்போம். ஒரு பொருளின் நீளத்தை அளப்பதற்கு அதன்மீது மீட்டர் அளவு கோலை வைத்து, அதன் இரு முனைகளின் அளவீடுகளைக் குறிப்போம். பொருள் இயங்கிக்கொண்டிருக்குமானால், இவ் விரு அளவீடுகளை ஒரே நேரத்தில் குறிக்கவேண்டும். ஒரு பொருள் S ஆயக் கட்டத்தில் அமைதி நிலையில் இருக்கும்போது, $l = x_2 - x_1$ என்பதை அதன் நீளமாகக் கொள்வோம். x_1 x_2 ஆகியவற்றின் மதிப்புகளைச் சமன்பாடு (2·22) தருகின்றது.

$$x_1 = \frac{x_1' + vt_1'}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad \ldots \quad (2.23)$$

$$x_2 = \frac{x_2' + vt_2'}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad \ldots \quad (2.24)$$

இப்பொழுது S' ஆயக்கட்டத்திலுள்ள நோக்குநர் பொருளின் முனைகள் இரண்டிற்கும் இடையேயுள்ள தொலைவை $x_2' - x_1'$ என்று அளப்பர். x_1', x_2' ஆகியவற்றின் மதிப்பு t_1', t_2' ஆகிய நேரங்களில் அளக்கப்பட்டால்,

$$l_1' = x_2' - x_1' = \sqrt{1-\beta^2}\,(x_2 - x_1) \qquad \ldots \quad (2.25)$$

$$= \sqrt{(1-\beta^2)}\cdot l_1$$

ஆகும். இதனின்றும், S' ஆயக் கட்டத்தில் இருக்கும் சோதனையாளர் S ஆயக் கட்டத்திலிருக்கும் l செ.மீ. நீளமுள்ள பொருளின் நீளத்தை l' என்ற குறைவான நீளமாகவே கணக்கிடமுடியும். இதுவே "லாரன்ட்ஸ்-ஃபிட்ஸ் ஜெரால்டு குறுக்கம்" எனப்படுகிறது.

இதனின்றும் நாம் சில விளைவுகளைப் பெறலாம்.

(அ) சோதனையாளருடன் இயங்கிக்கொண்டிருக்கின்ற ஆயக் கட்டத்தில் கோள வடிவமுடைய ஒரு பொருள், இந்த ஆயக் கட்டத்திற்குச் சார்புத் திசை வேகத்துடன் இயங்கிக்கொண் டிருக்கும் மற்றோர் ஆயக் கட்டத்தில் நீண்ட கோள வடிவமுடைய தாகக் (Ellipsoid) காணப்படும்.

(ஆ) மேற்கண்ட நிபந்தனைகளுடன் கூடிய ஆயக் கட்டங் களில் முதல் ஆயக் கட்டத்தில் கனசதுர வடிவுடைய ஒரு பொருள் நீள் சதுர வடிவுடையதாகத் தோன்றும்.

இவற்றைக் கீழ்க்கண்டவாறு விளக்கலாம்.

கோளத்திலோ அல்லது கன சதுரத்திலோ இருக்கும் மிகத் தொலைவான புள்ளிகள், அவற்றைக் காட்டிலும் நமக்கு அண்மையிலிருக்கும் புள்ளிகள் புலப்படுவதைவிட ஒரு சிறிது நேரம் கழித்தே புலப்படுகின்றன எனலாம். இந் நேரத்தை ஒளி நம் கண்களை அடைவதற்கு எடுத்துக் கொள்ளும் நேரம் எனக் கருதலாம்.

எடுத்துக்காட்டு 2

கொடுக்கப்பட்ட ஒரு தண்டின் நீளம் 5 மீட்டர்கள். இத் தண்டு பூமியைச் சார்ந்து 0·9 C திசை வேகத்தில் இயங்கு கின்றது. தண்டோடு இயங்குகின்ற நோக்குநர் இதன் நீளத்தை எவ்வளவாக அளப்பர் ?

$$l = 5\ m$$

$$v = 0{\cdot}9\ c$$

$$l' = l\sqrt{1-\beta^2}$$

$$= l\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = l\sqrt{\frac{c^2-v^2}{c^2}}$$

$$= 5\left[\frac{c^2-(0{\cdot}9c)^2}{c^2}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 5\times 0{\cdot}19$$

$$= 0{\cdot}95\ m$$

$= 0{\cdot}95$ மீட்டர்கள்

2·7 ஐன்ஸ்டீனின் கால விரிவு (Time Dilation)

எவ்வாறு நீளத்தின் அளவீடுகளைச் சார்பு இயக்கம் பாதிக்கின்றதோ அவ்வாறே அது கால அளவீடுகளையும் பாதிக்கின்றது எனலாம். s' ஆயக்கட்டத்தில் உள்ள நோக்குநர் ஒருவர் குறிப்பிட்ட இரு நிகழ்ச்சிகளுக்கு இடைப்பட்ட கால இடைவெளியை $t_2'—t_1'$ என்று கணக்கிடுவார். அதே கால இடைவெளியை s ஆயக்கட்டத்தில் உள்ள ஒருவர் $t_2—t_1$ என்று கணக்கிடுவார். இவ் விருவரின் கால அளவீடுகளை லாரன்ட்ஸ் படிமாற்றச் சமன்பாடுகளைப் பயன்படுத்திச் சார்புறுமாறு செய்தால்

$$t_1' = t_1 + \frac{vx_1}{c^2}\,; \qquad t_2' = t_2 + \frac{vx_2}{c^2}\,.$$

$$\therefore \quad \Delta t' = t_2'—t_1' = \frac{t_2—t_1}{\sqrt{1—\beta^2}} = \frac{\Delta t}{\sqrt{1—\beta^2}} \qquad \dots \quad (2.26)$$

எனவே s' ஆயக்கட்டத்தில் உள்ள கண்ணுறுவோர் (observer) அளவிடும் கால இடைவெளியை s ஆயக்கட்டத்தில் உள்ள நோக்குநர் $\sqrt{1—\beta^2}$ அளவிற்கு மிகுதியாகக் காண்கின்றார். இதுவே ஐன்ஸ்டீனின் கால விரிவு (Einstein's time dilation or dilatation) என்றழைக்கப்படுகின்றது.

s'-ல் உள்ள கடிகாரம் அந்த ஆயக்கட்டத்தில் பிணைக்கப்பட்டிருப்பதாகக் கொள்வோம். (காட்டாக, ஒரு ராக்கெட்டில் பிணைக்கப்பட்டிருப்பதாகக் கொள்வோம்). பூமியின்மேல் உள்ள ஒரு நோக்குநர் (s-ஆயக்கட்டத்திலிருப்பவர்). s'-லிலுள்ள கடிகாரத்தில் பார்த்தாரானல்

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1—\beta^2}}$$

என்பதைப் பார்ப்பார். இங்கும் நேர இடைவெளி நீண்டிருக்கும். எனவே, இயங்கிக்கொண்டிருக்கும் எல்லா கடிகாரங்களும் மெல்லச் (slowly) செல்வதாக நிலைத்து நிற்கும் ஒரு நோக்குநர் முடிவு செய்வார்.

இப்பொழுது சமன்பாடு (2·26)-லிருந்து இயங்கிக்கொண்டிருக்கின்ற கடிகாரத்தில், கால அலகு $(1—\beta^2)^{-\frac{1}{2}}$ மடி அதிகமாகிறது எனத் தெரிகின்றது. ஆகையால் இயங்கிக்கொண்டிருக்கும் கடிகாரங்கள் நிதானமாகச் செல்கின்றன என அறியலாம்.

t_r என்பதை இயங்கிக்கொண்டிருக்கும் ராக்கெட்டிலுள்ள கடிகாரம் காண்பிக்கும் ஒரு குறிப்பிட்ட கால அளவு என்று கொண்டோமானால், இதனைப் பூமியின்மேல் உள்ள நோக்குநர் t_e என்று அளப்பார். எனவே t_r-க்கும் t_e-க்கும் உள்ள தொடர்பை

$$t_r = t_e \sqrt{1-\beta^2}$$

என்று எழுதலாம்.

இதற்கு எடுத்துக்காட்டாக μ-மீசான்களின் வாழ்வுக் காலங்களைக் கூறலாம். μ-மீசான் என்பது எலக்ட்ரானைப் போன்று 207 மடங்கு நிறையையும் அதே அளவு மின்னூட்டத்தையும் கொண்டதுமான ஒரு வகைத் துகள். அதி உயரத்திலுள்ள வளி மண்டலத்தில் முதல்நிலைக்காஸ்மிக்-கதிர்கள் தாக்குகின்றபோதே இவை உண்டாகின்றன. குறைந்த அளவு திசை வேகங்களைக் கொண்ட மீசான்களைச் சோதனைச்சாலைகளிலும் உற்பத்தி செய்யலாம். இவை கதிரியக்கம் கொண்டவை. சராசரியாக $2{\cdot}2 \times 10^{-6}$ விநாடிகள் வாழ்வுக் காலம் கொண்டவை. இவை கதிரியக்கம் அடையும்பொழுது எலக்ட்ரான்களை உமிழ்கின்றன. காஸ்மிக் கதிர்களால் உற்பத்தியடையும் μ-மீசான்களில் பெரும்பான்மையானவை கதிரியக்கத்தினால் தேய்வடைவதற்குள் அதிக கால அளவிற்கு வாழ்கின்றன. ஏனெனில், இம் மீசான்களெல்லாம் ஒளியின் திசை வேக அளவிற்குத் திசை வேகங்கள் கொண்டு இயங்குகின்றன. இந்த மீசான்களின் சராசரி வாழ்வுக் காலங்கள் இம் மீசான்களோடு இயங்குகின்ற கடிகாரத்தினால் அளக்கப்படுமேயானால் இவை ஏறத்தாழ $2{\cdot}2 \times 10^{-6}$ விநாடிகளுக்குச் சமமாக இருப்பதைக் காணலாம்.

எடுத்துக்காட்டு—3

μ-மீசானின் சரியான சராசரி வாழ்வுக் காலம் 2×10^{-6} விநாடி. தரைமட்டத்திலிருந்து ஒரு குறிப்பிட்ட உயரத்தில் ஒரு μ-மீசான் கற்றை உற்பத்தி செய்யப்பட்டு, தரையை நோக்கி $v = 0{\cdot}99\, c$ திசை வேகத்தில் இயங்குகின்றதாகக் கொள்க. உற்பத்தி செய்யப்பட்ட μ-மீசான்களில் ஒரு விழுக்காடு மட்டும் தரையை வந்தடைகிறது என்றால், எந்த உயரத்தில் அவை உற்பத்தி செய்யப்பட்டன என்பதைக் கணக்கிடவும்.

μ-மீசானோடு இணைந்த ஆயக்கட்டத்தில் 't' நேரத்திற்குப் பிறகு வாழ்கின்ற துகள்களின் எண்ணிக்கையைக் கீழ்கண்ட சமன்பாடு கொடுக்கிறது.

$$\frac{N_t}{N_0} = \frac{1}{100} = e^{\frac{-t_E}{\zeta}}.$$

இங்கு ζ என்பது துகளின் சராசரி வாழ்வுக்காலம். t_E என்பது μ-மீசான் ஆயக்கட்டத்தில் அளவிடப்படும் கால அளவு.

$$= e^{t_E/\zeta} = 100$$

அல்லது

$$t_E = \zeta \log 100 = (2 \times 10^{-9}) \times 2{\cdot}3 \times 2$$

$$= 9{\cdot}2 \times 10^{-9} \text{ விநாடிகள்.}$$

இப்பொழுது t_A என்பது பூமியின் மேல் (வளிமண்டலத்தில்) அளவிடப்படும் அளவானால்.

$$t_A = \frac{t_E}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{9{\cdot}2 \times 10^{-8}}{\sqrt{1-(0{\cdot}99)^2}}$$

$$= 6{\cdot}5 \times 10^{-5} \text{ விநாடிகள்}$$

எனவே உயரம் $= 0{\cdot}99C \times 6{\cdot}5 \times 10^{-5}$

$$= 2 \times 10^6 \text{ செ.மீ.}$$

அல்லது

$$= 2 \times 10^4 \text{ மீட்டர்கள்.}$$

s, s^1 ஆயக்கட்டங்களில் நீளம், நேரம் ஆகியவை தோற்ற மாறுதல்கள் அடைந்தாலும், இவற்றில் கண்ணுறப்படும் இயற்பியல் நிகழ்ச்சிகள் எல்லாம் ஒன்றாகத்தான் இருக்கமுடியும். s^1 ஆயக்கட்டத்தில் நிகழ்த்தப்படும் சோதனை ஒன்றை மாறாத திசை வேகத்தோடு இயங்கிக்கொண்டிருக்கும் s ஆயக்கட்டத்திலுள்ள நோக்குநர் வேறாகப் பார்த்தாலும், லாரன்ட்ஸின் படிமாற்றச் சமன்பாடுகளின் துணை கொண்டு, s^1 ஆயக் கட்டத்திலுள்ள ஒருவர், s ஆயக்கட்டத்தில் நிகழ்த்தப்படும் சோதனைகள் அதே இயற்பியல் விதிகளைப் பின்பற்றுகின்றன என்று நினைப்பார் என்று உண்மைப்படுத்தலாம்.

மேலே கண்டவற்றுள் 'கடிகாரம்' என்பது சரியான கால இடைவெளிகளைக் கொடுக்கும் ஏதாவது ஒரு சாதனமாகவும் இருக்கலாம். அது அலைவுறுகின்ற ஒரு படிகமாகவோ, அதிர்வுறுகின்ற ஓர் அணுவாகவோ, கதிரியக்கமுடைய ஒரு துகளாகவோ இருக்கலாம்.

இப்பொழுது 'இரட்டையர் புதிர்' (twin paradox) என்ற ஒரு புதிரைக் காண்போம். ஒன்றுக்கொன்று சார்புத்திசை வேகங்கொண்ட இரு கட்டங்களில் A, B என்ற இரட்டையர் இருப்பதாகக் கொள்வோம். ஐன்ஸ்டீனின் கால விரிவுக் கொள்கைப்படி, ஒருவர் மற்றொருவரின் வாழ்க்கை நிதானமாகக் கழிகிறது என்று நினைப்பார். அதாவது A, T_A என்ற வயதை அடைந்தவுடன், அவர் B-யின் வயது T_B தன் வயதைக் காட்டிலும் குறைவு $(T_B<T_A)$ என்று நினைப்பார். அதே நேரத்தில் B, Aன் வயதான $T_A{}'$ தன் வயது $T_B{}'$ஐக் காட்டிலும் குறைவு என்று நினைப்பார் $(T_A{}'<T_B{}')$. இவ்வாறு ஒருவர் மற்றவர் வயது தன் வயதைவிடக் குறைவு என்று நினைப்பது ஒரு புதிராக உள்ளது. நடைமுறையில் இருவரையும் ஒருங்கு சேர்க்க முடிந்தால், இருவர் வயதையும் ஒப்பிட்டுப் பார்க்க முடியும். இவ்வாறு நடைபெறுவதற்கு அவர்கள் பயணம் செல்லும் இரண்டு ஆயக் கட்டங்களில் ஏதாவதொன்றை முடுக்குவிக்க வேண்டும். ஆனல் இரண்டு ஆயக் கட்டங்களும் "நிலைம ஆயகட்டங்களாகையால்" இது இயலாததொன்ருகும்.

2·8. திசை வேகங்களுக்கான படிமாற்று விதிகள்

சார்புக் கொள்கையின்படி, ஒரு திசை வேகத்தின் படிமாற்றம் பண்டைய கொள்கையிலிருந்து தருவித்த திசை வேகத்தின் படிமாற்றத்திற்கு முற்றிலும் வேறுபட்டது என்பதைப் பார்ப்போம். s ஆயக்கட்டத்தில் ஒரு பொருளின் திசை வேகத்தின் x கூறு U_x என்றும், s' ஆயக் கட்டத்தில் அதன் திசை வேகத்தின் x கூறு $U_x{}'$ என்றும் கொள்வோம். முன்பு கூறியது போல் s' ஆயக்கட்டம் s ஆயக்கட்டத்திற்குச் சார்பாக x அச்சின் திசையில் v என்ற திசைவேகத்தோடு இயங்குகிறது எனவும் கொள்வோம். இப்பொழுது

$$u_x{}' = \frac{dx'}{dt}, \quad u_x = \frac{dx}{dt}.$$

லாரன்ட்ஸ் படிமாற்றச் சமன்பாடுகளின்படி

$$u_x{}' = \frac{dx-udt}{dt-\frac{udx}{c^2}} = \frac{u_x-v}{1-\frac{vu_x}{c^2}} \quad \ldots \quad (2{\cdot}27)$$

இதில் v ன் மதிப்பு c-ன் மதிப்பைவிடக் குறைவாக இருக்கும்பொழுது $(v<<c)$ $U_x{}'=U_x-v$ என்ற பண்டைய கொள்கையின் படி கிடைக்கும் சமன்பாடாகிறது.

அவ்வாறே,

$$u_x = \frac{u_x' + v}{1 + \frac{vu_x'}{c^2}} \qquad \dots \quad (2{\cdot}28)$$

u-ன் மதிப்பும், v-ன் மதிப்பும் c-ன் மதிப்பை அடைகிற பொழுது கூட்டுத்திசை வேகம் c'-ன் மதிப்பைக் காட்டிலும் குறைவாகவே உள்ளது என்பது குறிப்பிடத்தக்கது. இவ்வாறே y, z கூறுகளுக்குமான சமன்பாடுகளைக் கீழ்க்கண்டவாறு எழுதலாம்.

$$u_y' = \frac{dy'}{dt} = \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1-\frac{uxv}{c^2}}\, u_y \qquad \dots \quad (2.29)$$

$$u_z' = \frac{dz'}{dt} = \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1-\frac{uxv}{c^2}}\, u_z \qquad \dots \quad (2.30)$$

மாதிரிக் கணக்கு 4

ஓர் அணுக்கருச் செயலீட்டில் அணுக்கருத் துகள் ஒன்று இரண்டு துண்டுகளாகப் பிரிந்து எதிர்த் திசைகளில் செல்கின்றன. ஒவ்வொரு துண்டும் சோதனைச் சாலையைப் பொறுத்து $0{\cdot}8c$ வேகத்தோடு இயங்குகிறதென்றால் துண்டுகளின் சார்புத் திசை வேகத்தைக் கணக்கிடுக.

இச் சார்புத்திசை வேகத்தை u_x எனக் கொள்க.

$$U_x = \frac{u_x' + v}{1 + \frac{vu_x}{c^2}}$$

இங்கு $u_x' = v = 0{\cdot}8c$.

எனவே

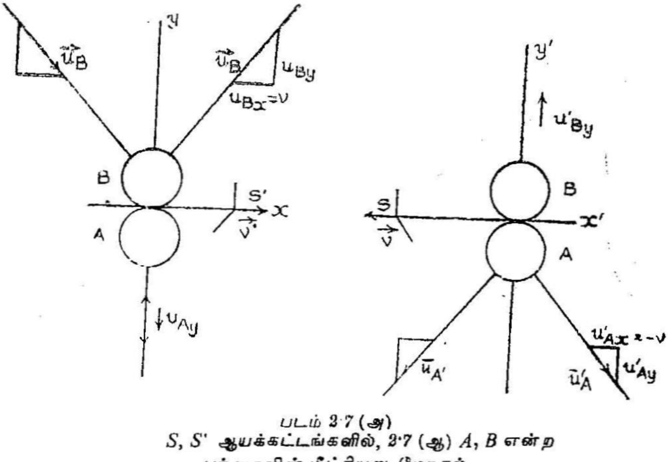
$$U_x = \frac{0{\cdot}8c + 0{\cdot}8c}{1 + \frac{0{\cdot}8c \times 0{\cdot}8c}{c^2}} = \frac{1{\cdot}6c}{1{\cdot}64} = 0{\cdot}98\, c$$

2·9. திசை வேகத்தைப் பொறுத்துப் பொருள்களின் நிறை மாற்றம்

இயற்பியலில் இருக்கும் நடைமுறை விதிகளை உற்று நோக்குங்கால், சார்புக் கொள்கையின் முதல் எடுகோளிலேயே

அவை அடங்கிவிடுகின்றன என்று கூறமுடியாது. எனவே, எல்லா நிலைமத் தொகுதிகளுக்கும் பொருந்தக்கூடிய இயற்பியல் விதிகளைக் கண்டுபிடிப்பது கடினமாக உள்ளது. உந்தம் மாருத விதியை (Law of Conservation Momentum) எல்லா நிலைமத் தொகுதிகளுக்கும் பொருந்தக்கூடிய ஒரு விதி எனலாம். "உந்தம் மாறு விதி" எல்லாத் தொகுதிகட்கும் பொருந்தவேண்டுமாயின் ஒரு பொருளின் நிறையளவு கண்ணுறுவோரின் இயக்கத்திற்குத் தகுந்தாற்போல் மாற வேண்டும். இதைத் தவிர்த்து, எல்லா நிலைமத் தொகுதிகளிலுமுள்ள கண்ணுறுவோர்களின் பொருள் நிறைகளை ஒரே விதி கொண்டு நிர்ணயிக்க வேண்டும். இதை எவ்வாறு அடைவது என்று நாம் இப்பொழுது காண் போம்.

s, s' என்ற ஆயக்கட்டங்கள் இரண்டில், இரு கண்ணுறுவோர் இருக்கின்றனர் எனக் கொள்க. s' ஆயக்கட்டமானது s-ஆயக் கட்டத்தைப் பொறுத்து v திசைவேகத்தில் x-அச்சுத்திசையில் இயங்குகிறது எனவும் கொள்க.



படம் 2·7 (அ)
S, S' ஆயக்கட்டங்களில், 2·7 (ஆ) A, B என்ற பந்துகளின் மீட்சியுறு மோதல்

ஒவ்வோர் ஆயக்கட்டத்திலும் நிலைமத்திலிருக்கும் போது m_0 நிறை கொண்ட, எல்லாப் பண்புகளிலும் சமமான A, B என்ற இரு பந்துகளை எடுத்துக்கொள்வோம். இவை இரண்டும் முழு மீட்சியுறு மோதல் (elastic collision) அடையக்கூடியவை எனவும் கொள்க. படம் (2·7 அ)-ல் s ஆயக்கட்டத்தில் அவற்றின் மோதல் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. படம் (2·7 ஆ)-ல் s' ஆயக்

கட்டத்தில் அவற்றின் மோதல் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. இவ்விரு பந்துகளும் எல்லாத் தன்மைகளிலும் சமமானவையாதலால், மோதலுக்குப் பின் அவற்றின் வேகங்கள் மாறா. அதாவது அவற்றின் வேகங்கள் மோதலுக்குப் பின்னும் முன்னும் சமமாக இருக்கும். எனவே, படமானது y-அச்சுத் திசையில் சமச் சீராக இருக்கும். இயக்கமானது மோதல் புள்ளியில் எதிரொளிப்பு நிகழ்ந்ததுபோல் இருக்கும்.

இப்பொழுது $U_{Bx} = V$ ஆக இருப்பதால் திசை வேகங்களில் கூட்டலுக்கான சமன்பாடுகள் (2·27), (2·29) ஆகியவற்றிலிருந்து கீழ்க்கண்டவற்றைப் பெறலாம்.

$$\left.\begin{aligned} U'_{Ax} &= V. \qquad U'_{Ay} = \sqrt{1-\beta^2}\;\; U_{Ay} \\ U'_{Bx} &= O. \qquad U'_{By} = \frac{U_{By}}{\sqrt{1-\beta^2}} \end{aligned}\right\} \ldots \quad (2\cdot31)$$

இங்கு $\beta = v/c$. இதிலிருந்து s' ஆயக்கட்டத்தில் பந்துகளின் y-கூறுகள் தகவைப் பின்வருமாறு பெறலாம்.

$$\frac{U'_{Ay}}{U'_{By}} = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)\frac{U_{Ay}}{U_{By}} \qquad \ldots \quad (2\cdot32)$$

இதனின்றும்,

$$\frac{U'_{Ay}}{U'_{By}}, \quad \frac{U_{Ay}}{U_{By}}$$

இரண்டையும் சமமாக ஆக்குவது இயலாது என அறிகிறோம். ஓர் ஆயக்கட்டத்தில் இத் தகவின் மதிப்பு ஒன்று ஆகவும், மற்ற ஆயக்கட்டத்தில் ஒன்றிற்குக் குறைந்தோ அதிகமாகவோ இருக்க முடியாது. ஆனால் 'உந்தம் மாறாக் கொள்கை' யின்படி, உந்தங்களின் y கூறுகளின் தகவு இரண்டு ஆயக்கட்டங்களிலும் சமமாக இருக்க வேண்டும். ஆனால் திசை வேகங்களின் y-கூறுகளின் தகவு இரண்டு ஆயக்கட்டங்களிலும் வேறுபட்டிருப்பதால், உந்தங்களைக் கணக்கிடுவதற்குப் பயன்படுத்தப்பட்டிருக்கின்ற நிறைகள் இரண்டு ஆயக்கட்டங்களிலும் வெவ்வேறாக இருக்க வேண்டும். நிலைமத்தில் அல்லது சுழி இயக்கத்தில் இரண்டு நிறைகளும் சமம் என்று எடுத்துக்கொண்டோமாகையால், நிறைகளின் மதிப்பு அவற்றின் திசைவேகங்களைப் பொறுத்திருக்கும் என்பது பெறப்படுகிறது. உந்தமும் திசை வேகமும் ஒரே திசையைக் கொண்டிருக்க வேண்டுமாகையால் m-ன் மதிப்பு

u-வின் திசையைப் பொறுத்திருக்காது. அதாவது m ஒரு ஸ்கேலார் (scelar) அளவீடு. இதிலிருந்து $m = m_0\, \alpha(u)$ என்று இருக்க வேண்டும். இதில் m_0 என்பது, s, s^1 என்ற இரண்டு ஆயக்கட்டங்களிலுமுள்ள கண்ணுறுவோர் மதிப்பிடும் சுழி இயக்க நிறை. $\alpha(u)$ என்பது u-வைப் பொறுத்த ஒரு கோர்வை.

$\alpha(u)$ என்பதை,

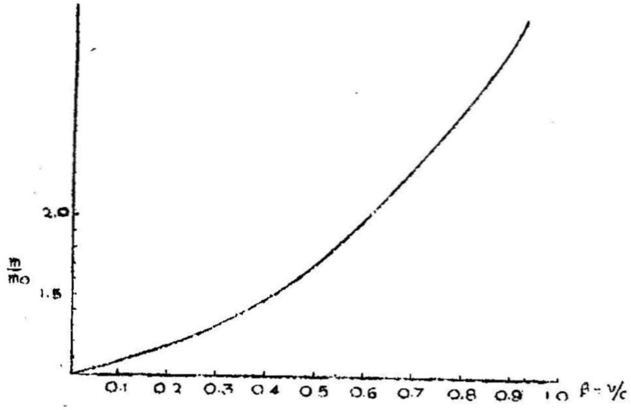
$$\alpha(u) = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \qquad \ldots \quad (2{\cdot}33)$$

என்று எளிதாகத் தருவிக்கலாம். எனவே

$$\boxed{m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}} \qquad \ldots \quad (2{\cdot}34)$$

மேற்கண்ட சமன்பாடு ஒரு பொருளின் " நிலைம அல்லது சுழி இயக்க நிறையையும்", v-திசை வேகத்தில் இயங்கிக்கொண்டிருக்கும்பொழுது அதன் நிறையையும் தொடர்புபடுத்துகின்றது.

இச் சமன்பாட்டின் உண்மை பல சோதனைகளினால் நிலை நிறுத்தப்பட்டிருக்கிறது. காஃப்மென், புஷேரர் என்ற இரு



படம் 2·8.
திசைவேகத்தைப் பொறுத்து நிறை மாறுதல்

விஞ்ஞானிகளின் சோதனை இங்குக் குறிப்பிடத்தக்கது. இவர்கள் இயற்கைக் கதிரியக்கத்தில், ஏறத்தாழ ஒளியின் திசைவேகத்

திற்குச் சமமான திசை வேகங்களோடு உமிழப்படும் β-துகள்களைக் காந்தப்புலம் அல்லது மின்புலம் கொண்டு வளைத்து, இவைகளின் நிறைகளைக் கண்டறிந்தனர். பல்வேறு திசை வேகங்கள் கொண்ட β-துகள்களின் நிறைகள் அளக்கப்பட்டன. v-திசை வேகத்தில் இயங்கும் β-துகளின் m என்ற நிறைக்கும், அமைதி நிலையிலுள்ள நிறைக்கும் உள்ள தகவையும், $\beta = v/c$ என்பதையும் இணைத்து அவர்கள் ஒரு வரைபடம் வரைந்தனர். இது படம் 2·8-ல் மேலே காண்பிக்கப்பட்டுள்ளது. இதிலிருந்து ஒரு பொருளின் நிறையானது அதன் திசை வேகத்தைப் பொறுத்தது என்பது நன்கு விளங்குகின்றது.

மாதிரிக் கணக்கு 5

ஒரு பொருளின் அமைதி நிலை நிறை 10 கிராம். அது 3×10^9 செ. மீ. திசை வேகத்தோடு இயங்குகின்றபொழுது அதன் நிறை எவ்வளவு இருக்கும்?

$$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c_2}$$

$$= \frac{10}{\sqrt{1 - \frac{(3 \times 10^9)^2}{(3 \times 10^{10})^2}}} = \frac{100}{\sqrt{99}} = 10{\cdot}05 \text{ கிராம்.}$$

2·10. ஒரு பொருளின் நிறைக்கும் ஆற்றலுக்கும் உள்ள தொடர்பு

தனிச் சார்புக் கொள்கைப்படி, நீளம் நேரம் ஆகியவைகளின் விளக்கங்களைப்பற்றிப் படித்தோம். அது போன்றே, சார்புக் கொள்கையின் அடிப்படையில் திசை வேகங்களின் தொகுபயன், பொருள்களின் நிறை ஆகியவை எவ்வாறு பண்டைய கொள்கைக்குப் புறம்பாக மாறுபடுகின்றன என்றும் கண்டோம். பொருள்களின் நிறையைப் பற்றிய விளக்கம், நாம் இதுகாறும் ஆற்றலைப்பற்றிக் கொண்டிருந்த எண்ணங்களை அடியோடு மாற்றுகின்றது எனலாம்.

நியூட்டனின் இரண்டாவது இயக்க விதியின்படி

$$\overrightarrow{F} = \frac{d}{dt}(m\overrightarrow{v}) = m\frac{d\overrightarrow{v}}{dt} \qquad \ldots \quad (2{\cdot}35)$$

இதில் பொருளின் நிறை மாறிலி எனக் கொள்ளப்பட்டது. ஆனால், சார்புக் கொள்கையின்படி, பொருளின் நிறையும் திசை வேகத்தை ஒட்டி மாறுபடுவதால், நியூட்டனின் விதியை

$$\overrightarrow{F} = \frac{md\overrightarrow{v}}{dt} + \overrightarrow{v}\ \frac{dm}{dt}.$$

என்று எழுதலாம்.

இங்குப் பொருளின்மீது செயல்படும் விசையானது பொருளின் ஆற்றலை மாற்றுவதில்லை என்றும், ஆனால், அதன் இயக்க வாற்றலையே அதிகமாக்குகிறது என்றும் எடுத்துக்கொண்டோமானால், இயக்க ஆற்றல் வேறுபாடு

$$d\,K = F\,dx$$

$$= m\frac{dv}{dt}dx + V\frac{dm}{dt}dx.$$

$$\left[\ \because \frac{dx}{dt} = dv\ \right]$$

$$= mV\,dV + V^2\,dm \qquad \dots \quad (2{\cdot}36)$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\ .\ dm = \frac{m_o\,V\,dr}{c^2\left(1 - \dfrac{v^2}{c^2}\right)^{3/2}} \qquad \dots \quad (2{\cdot}37)$$

$\beta = \dfrac{V}{C}$ என்று கொண்டால்,

சமன்பாடுகள் (2·36), (2·37) ஆகியவற்றினின்றும் dm-ஐ விடுவித்தோமானால்,

$$dK = \frac{moVdV}{(1-\beta^2)^{1/2}} + \frac{moV^3dV}{c^2\ (1-\beta^2)^{3/2}}$$

$$= \frac{m_oVdV}{(1-\beta^2)^{3/2}}\left[1 - \beta^2 + \frac{V^2}{C^2}\right] = \frac{moVdV}{(1-\beta^2)^{3/2}} \qquad \dots \quad (2{\cdot}38)$$

இப்பொழுது K-ன் மதிப்பைக் கண்டுப்பிடிப்பதற்கு மேற்கண்ட சமன்பாட்டிற்குத் தொகுநி கண்டுபிடிக்க வேண்டும்.

$$\therefore \quad K = \int_{o}^{v} \frac{moVdV}{\left(1-\frac{V^2}{C^2}\right)^{3/2}}$$

$\left[\omega = \left(1- \frac{v^2}{c^2} \right) \right.$ என்று கொண்டு மேற்கண்ட தொகுதியைக் கண்டுபிடிக்கலாம். $\left. \right]$

இங்கு $\beta = V/c$.

மேற்கண்ட சமன்பாட்டின் தொகுதியில், $v = o$, $v = v$ என்ற வரம்புக் கட்டுப்பாடுகளைச் சரியீடு செய்தால்,

$$K = m_o c^2 \left[\frac{1}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}} - 1 \right]$$

$$= mc^2 - m_o c^2 \qquad \ldots \quad (2{\cdot}39)$$

என்பது கிடைக்கும். இதில் m_o என்பதைப் பொருளின் அமைதி நிலை நிறை என்று கொண்டோமானால் அதன் மொத்த ஆற்றல் E,

$$E = K + m_o c^2 = mc^2 \qquad \ldots \quad (2{\cdot}40)$$

என ஆகும். சமன்பாடு (2·40)-லிருந்து பொருளின் மொத்த நிறைக்கும் அதன் மொத்த ஆற்றலுக்கும் இடையே உள்ள தொடர்பு கிடைக்கிறது.

இச் சமன்பாடு அணுக்கரு இயற்பியலில் அனேகமாக எல்லா இடங்களிலும் பயன்படுத்தப்படுகிறது. $E=mc^2$ என்ற இந்தச் சமன்பாடு "**நிறை-ஆற்றல் இணைமாற்றுச் சமன்பாடு**" என்று அழைக்கப்படுகிறது. இச் சமன்பாட்டைக் கீழ்க்கண்டவாறும் எழுதலாம்.

$$E = \frac{m_o c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = m_O c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$$

அடைப்புக்குறிகளில் இருக்கும் தொடரை, ஈற்றுறுப்புத் தேற்றத்தின் (Binomial Theorem) உதவி கொண்டு விரிவுபடுத்தினால்

$$E = m_o c^2 \left[1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8}\,\frac{v^4}{c^4} + \ldots \right] \qquad \ldots \quad (2{\cdot}41)$$

என்பது கிடைக்கிறது. இதில் $V<<C$ எனக்கொண்டு, முதல் இரு உறுப்புக்களை மட்டும் ஏற்றுக்கொண்டால்,

$$E = mc^2 = m_o c^2 + \tfrac{1}{2} m_o v^2 \quad \dots \quad (2{\cdot}42)$$

நாம் எப்பொழுதும் இயக்கவாற்றலை $\frac{1}{2}m_o v^2$ எனக் குறிக்கின்றோம். ஆனால், பொருளின் திசைவேகம் V ஆனது C-யைவிட மிகக் குறைவாக இருந்தால்தான் $K = \frac{1}{2}m_o v^2$ எனச் சொல்வது பொருந்தும். திசை வேகம் அதிகரிக்க அதிகரிக்கப் பொருளின் இயக்கவாற்றல் சமன்பாடு **(2·39)**-ஆல் குறிப்பிடப்பட வேண்டும்.

பண்டைய கொள்கையின்படி, நிறை மாறிலியாக இருப்பதால், ஒரு பொருளின் உந்தத்திற்கும் அதன் ஆற்றலுக்கும் உள்ள தொடர்பை

$$p^2 = 2mk \quad \dots \quad (2{\cdot}43)$$

என்று எழுதலாம். ஆனால், சார்புக் கொள்கையைப் பயன்படுத்தி, இதைப் போலவே ஒரு பொருளின் உந்தத்திற்கும், ஆற்றலுக்கும் உள்ள தொடர்பைத் தருவிக்கலாம்.

$$m^2c^4 - m_o^2c^4 = m_o^2c^4\left[\frac{1}{1-\beta^2} - 1\right]$$

$$= \frac{m_o^2c^4\beta^2}{1-\beta^2} = \frac{m_o^2c^2V^2}{1-\beta^2}$$

$$= m^2V^2c^2 = c^2p^2$$

எனவே,

$$E^2 = c^2p^2 + m_o^2c^4 = c^2p^2 + E_O^2 \quad \dots \quad (2{\cdot}44)$$

இங்கு $E_O = m_oc^2$ என்பது பொருளின் நிலைம ஆற்றல். இதை,

$$E^2 = (K - E_O)^2 = K^2 + 2KE_O + E_o^2$$

$$= c^2p^2 + E_o^2$$

என்றெழுதலாம்.

$$c^2p^2 = K^2 + 2KE_o \quad \dots \quad (2{\cdot}45)$$

என்ற சமன்பாட்டைப் பெறலாம்.

பண்டைய எந்திரவியல் இயற்கையின் ஒரு பகுதியை மட்டுந்தான் நமக்கு அறிவுறுத்துகிறது என்பது சார்புக் கொள்கையினின்றும் தெரியவருகின்றது. இதிலிருந்து பண்டைய

எந்திரவியல் இயற்கையை முற்றிலும் விளக்கத் தவறுகிறது என்பதை நாம் அறியலாம். இதனின்றும், சார்புக் கொள்கை இயற்பியலில் எந்த அளவிற்கு முக்கியம் வாய்ந்தது எனத் தெரிகின்றது.

மாதிரிக் கணக்கு 6

புரோட்டானின் நிறை $m_p = 1{\cdot}6725 \times 10^{-24}$ கிராம். இந் நிறைக்குச் சமமான ஆற்றலைக் கணக்கிடுக.

$m_p = 1{\cdot}6725 \times 10^{-24}$ கிராம்.

ஆற்றலை E என்று கொண்டோமானல்,

$$E = m_p c^2$$
$$= 1{\cdot}6725 \times 10^{-24} \times (3 \times 10^{10})^2$$
$$= 1{\cdot}6725 \times 10^{-24} \times 9 \times 10^{20}.$$
$$= 15{\cdot}0525 \times 10^{-4} \text{ எர்குகள்.}$$

ஓர் எர்கு $= 6{\cdot}242 \times 10^5$ மில்லியன் எலக்ட்ரான் வோல்ட்டுகள். எனவே, புரோட்டான் நிறைக்குச் சமமான ஆற்றல்

$$= 15{\cdot}0525 \times 10^{-4} \times 6{\cdot}242 \times 10^5$$
$$= 939{\cdot}3 \text{ மி. எ. வோ.}$$

மாதிரிக் கணக்கு 7

ஒரு r கதிர் ஃபோட்டான் அதிக அளவிற்கு முடுக்கம் பெறுகிறபொழுது 'எலக்ட்ரான் – பாசிட்ரான்' இரட்டையாக மாறுகிறது. எலக்ட்ரானின் அமைதி நிலை நிறை $m_0 = 9{\cdot}1 \times 10^{-25}$ கிராம் என்றால் ஓர் எலக்ட்ரான்—பாசிட்ரான் இரட்டையை உற்பத்தி செய்யவல்ல. r-ஃபோட்டானின் சிறும ஆற்றலை மி. எ. வோல்ட்டுகளில் கணக்கிடுக.

எலக்ட்ரான் நிறைக்குச் சமமான ஆற்றல்

$$E = m_0 c^2$$
$$= 9{\cdot}1 \times 10^{-28} \times (9 \times 10^{10})^2$$
$$= 9{\cdot}1 \times 10^{-28} \times 9 \times 10^{20}$$
$$= 81{\cdot}9 \times 10^{-8} \text{ எர்குகள்}$$
$$= 81{\cdot}9 \times 10^{-8} \times 6{\cdot}242 \times 10^5 \text{ மி.எ.வோ.}$$
$$= 0{\cdot}511 \text{ மி. எ. வோ.}$$

பாசிட்ரானும் எலக்ட்ரான் நிறையைக் கொண்டதாகையால் பாசிட்ரான் நிறைக்குச் சமமான ஆற்றல்,

$$= 0{\cdot}511 \text{ மி. எ. வோ.}$$

எனவே ஓர் எலக்ட்ரான்—பாசிட்ரான் இரட்டையை உற்பத்தி செய்யத் தேவையான r-∴ போட்டானின் சிறும ஆற்றல்

$$= 0{\cdot}511 + 0{\cdot}511 = 1{\cdot}022 \text{ மி. எ. வோ.}$$

மாதிரிக் கணக்கு 8

4 மில்லி கிராம் நிறையை முற்றிலும் ஆற்றலாக மாற்றினல் கிடைக்கும் ஆற்றலைக் கிலோ வாட் மணிகளில் கணக்கிடுக.

$$E = m_0c^2$$

$$= 4 \times 10^{-3} \times (3 \times 10^{10})^2 \text{ எர்குகள்}$$

$$1 \text{ கிலோ வாட் மணி} = 100 \text{ வாட்} \times 36 \times 10^2 \text{ விஞடி}$$

$$= 10^7 \times 10^3 \times 36 \times 10^2$$

$$= 36 \times 10^{12} \text{ எர்குகள்}$$

$$\text{எனவே ஆற்றல்} = \frac{4 \times 10^{-3} \times 9 \times 10^{20}}{36 \times 10^{12}}$$

$$= 10^5 \text{ கிலோ வாட் மணி}$$

மாதிரிக் கணக்கு 9

ஓர் எலக்ட்ரானின் அமைதி நிலை நிறை (அல்லது சுழி இயக்க நிறையை) எர்குகளிலும், எலக்ட்ரான் வேல்ட்டுகளிலும் கணக்கிடுக,

$$\text{எலக்ட்ரானின் அமைதிநிலை நிறை} = m_0 = 9{\cdot}11 \times 10^{-28} \text{ கிராம்.}$$

$$\text{அதன் ஆற்றல்} = m_0c^2 = 9{\cdot}11 \times 10^{-28} \times (3 \times 10^{10})^2 \text{ எர்குகள்}$$

$$= 8{\cdot}2 \times 10^{-7} \text{ எர்குகள்.}$$

$$1 \text{ எ. வோ.} = 1{\cdot}60 \times 10^{-12} \text{ எர்குகள்}$$

எனவே எலக்ட்ரானின்

$$\text{ஆற்றல்} = \frac{8{\cdot}2 \times 10^{-7}}{1{\cdot}60 \times 10^{-12}} \text{ எலக்ட்ரான் வேல்ட்டு}$$

$$= 0{\cdot}512 \times 10^6 \text{ எ. வோ.}$$

$$\therefore \text{ எலக்ட்ரானின் அமைதி ஆற்றல்} = 0{\cdot}512 \text{ மி. எ. வோ.}$$

மாதிரிக் கணக்கு 10

ஒரு குறிப்பிட்ட துகள், எந்தத் திசை வேகத்தில் அதன் அமைதிநிலை நிறையைப்போல் இரண்டு மடங்கு நிறையைக் கொண்டிருக்கும்?

$$m = 2m_0$$

$$\frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = 2m_0$$

$$\therefore \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = \tfrac{1}{2}$$

$$\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right) = \tfrac{1}{4}$$

$$\frac{v^2}{c^2} = \tfrac{3}{4}$$

அல்லது $\frac{v}{c} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0{\cdot}866$

$$\therefore v = 0{\cdot}866c$$

$$= 0{\cdot}866 \times 3 \times 10^8 \text{ மீட்டர்/செ.}$$

$$= 2{\cdot}664 \times 10^8 \text{ மீட்டர்/செ.}$$

பொதுச் சார்புக்கொள்கை

(அ) முன்னுரை

தனிச் சார்புக் கொள்கையின் விளைவுகளை நாம் முன்பே பார்த்தோம். தனிச் சார்புக் கொள்கையானது நிலைமக் கோப்புகளுக்கு மட்டும் பொருந்தும் மின் காந்த விளைவுகளைத்தான் நன்கு விளக்குகின்றது. ஆனால், பொதுச் சார்புக் கொள்கையோ முடுக்கம் பெற்ற சட்டங்கள் அல்லது கோப்புகளுக்கும் பொருந்துகின்றது. ஆகையால், அது அண்டங்களில் நிகழும் ஈர்ப்பு விளைவுகளை விளக்குகிறது. தனிச் சார்புக் கொள்கையினை விளக்க அனேக சோதனைகள் நிகழ்த்தப்பட்டுள்ளன. ஆனால், பொதுச் சார்புக் கொள்கையை விளக்க ஒரு சில நிகழ்ச்சிகளே உள்ளனவாகையால், தனிச் சார்புக் கொள்கையைக் காட்டிலும் பொதுச் சார்புக் கொள்கை சிறிது கடினமாக உள்ளது. மேலும், அது ஈர்ப்புப் புலங்களையும், ஈர்ப்பு விசைகளையும் முற்றிலும் நாம் அறியத் துணை புரியவில்லை.

(ஆ) முடுக்கம் பெற்ற சட்டங்கள் — ஈர்ப்புப்புலம்

பண்டைய கொள்கையின்படி பொருள்களுக்கிடையே தொழிற்படும் ஈர்ப்பு விசையே அவற்றின் முடுக்கத்திற்குக் காரணம் ஆகும் என்று எடுத்துக்கொள்ளப்பட்டது. சூரியன் அல்லது புவியை எடுத்துக்காட்டாகக் கொள்வோமாயின் அவற்றைச் சுற்றியுள்ள வெளியில் காணப்படும் எல்லாப் பொருள்களையும் இயக்கத்திற்கு உட்படுத்தக்கூடிய ஓர் உள்ளுறை விசை இருப்பதால்தான் அவை அப் பொருள்களைத் தம்மை நோக்கி இழுக்கின்றன எனலாம். அதாவது, பூமி, சூரியன் இவற்றைச் சுற்றியுள்ள வெளியில் ஈர்ப்பு விசை உள்ளுறைந்திருப்பதால் அந்த வெளியை 'ஈர்ப்புப்புலம்' என்றழைக்கலாம். இந்த ஈர்ப்பு விசையை விளக்குவதற்காக நியூட்டன் "தொலைவுச் செயல்" (action at a distance) என்ற எடுகோளைக் கொடுத்தார். பொதுச் சார்புக் கொள்கை 'ஈர்ப்புப் புலத்தினால் தான் ஈர்ப்பு விசைகள் தோற்றுவிக்கப்படுகின்றன' என்று விளக்குவதால், 'தொலைவுச் செயல்' எடுகோளின் காரணம் விளக்கப்படுகிறது எனலாம்.

(இ) இணைமாற்றுத் தத்துவம் (Principle of Equivalence)

பண்டைய கொள்கையில் ஈர்ப்புப் புலத்திற்காகக் கொடுக்கப்பட்ட விளக்கம் நன்கு பொருந்தவில்லை என்ற புரட்சிகரமான கருத்தை ஐன்ஸ்டீன் கொண்டிருந்தார். கண்ணுறுவோர் எடுத்துக் கொள்ளும் ஆயக்கட்டத்தைப் பொறுத்து ஈர்ப்புப் புலத்தைக் காணுதவாறு செய்யலாம் என்று அவர் கண்டார். அதாவது, முடுக்கம் பெற்ற ஆயக்கட்டத்தோடு இயங்குகின்ற ஒருவர் அக் கோப்பின் முடுக்கத்தை அறிய முடியாது என்றும் அவர் முடிவு செய்தார். இதன்படி, நாம் காணக்கூடிய நிகழ்ச்சி எந்த ஆயக்கட்டத்தில் நிகழ்கின்றதோ, அக் கட்டத்தின் சீரான முடுக்கமும் ஈர்ப்பு முடுக்கத்தின் விளைவுகளில் ஒன்றே என அறியலாம்.

மேற்கூறிய தத்துவத்தைப் பின்வரும் எடுத்துக்காட்டினுல் விளக்கலாம். ஈர்ப்பு விசையினுல் தானே விழுகின்ற ஒரு பொதியுறையை எடுத்துக்கொள்வோம். அதனுள் இருக்கும் நோக்குநர்களுக்குப் பொருள்கள் எங்கே வைக்கப்பட்டாலும் அவை அங்கங்கே மிதப்பனவாகத் தோன்றும். கிடைத்தளத்தில் எறியப்படும் பொருள் நேர்கோட்டுப் பாதையில் செல்லும். பொருள்கள் எடை ஒன்றும் காட்டா. அதாவது ஓர் ஈர்ப்புப்

புலத்தின் விளைவுகள் யாவும் மறைந்துவிட்டதாகத் தோன்றும். அதாவது, மேற்கூறிய பொதியுறை ஒரு குறிப்பிட்ட முடுக்கத்தைப் பெறுவதன்மூலம் ஈர்ப்புப் புலத்தை அறவே குறைத்துவிடலாம்.

எனவே, ஈர்ப்புப் புலத்தின் விளைவுகளிலிருந்து விண்மீன்களை ஒட்டித் தொழிற்படுகின்ற முடுக்கத்தின் விளைவுகளை ஒரு சோதனையாலும் பிரித்துக் காண முடியாது என்பது தெரிகிறது. இதிலிருந்து ஐன்ஸ்டீன் 'இணைமாற்றுத் தத்துவம்' என்ற ஒன்றை கொடுத்தார். அதனைப் பின்வருமாறு வரையறுக்கலாம்.

"மூடப்பெற்ற சோதனைச்சாலை ஒன்றில் நிகழ்த்தப்படும் ஒரு சோதனையாலும், ஈர்ப்புப்புலத்தின் விளைவுகளிலிருந்து விண்மீன்களை ஒட்டிச் செயல்படுகின்ற முடுக்கத்தின் விளைவுகளைப் பிரித்துக் காண முடியாது."

இத் தத்துவம், தனிச் சார்புக் கொள்கையில் கொடுக்கப்பட்ட நிறை-ஆற்றல் சமத்துவத்திலிருந்து முற்றிலும் மாறுபட்டது என்பதை நன்கு உணர்தல் வேண்டும்.

(ஈ) ஐன்ஸ்டீனின் ஈர்ப்புக் கொள்கையைச் சோதனை மூலம் உறுதிப் படுத்துதல்.

(i) புதனின் ஞாயிற்று அண்மை நிலை.

ஐன்ஸ்டீனின் தத்துவப்படி ஒரு கணமான பொருளுக்கு அருகிலுள்ள வெளிப்பகுதி வளைந்திருப்பதால், எந்தப் பொருளும் இப் பகுதியினுள் வந்தால் வளைவான பாதையில் செல்ல வேண்டும் என்பது பெறப்படுகிறது. இதையொட்டிச் சூரியனைச் சுற்றியுள்ள கோள்களின் சுற்றுப் பாதைகளை விளக்கலாம்.

சூரியனை மையமாகக் கொண்ட கோள்களின் சுற்றுப்பாதை வட்டமாக இருப்பின், ஐன்ஸ்டீனின் ஈர்ப்பு விதி நியூட்டனின் "இருமடி எதிர்" விதியாகச் சுருங்குகிறது. ஆனால், ஒழுங்கற்ற சுற்றுப்பாதை கொண்ட புதனின் சுற்றுப்பாதைக்கு ஐன்ஸ்டீனின் விதியிலிருந்து நியூட்டனின் விதி வேறுபடுகிறது. சோதனையில் இரண்டும் வெவ்வேறு முடிவுகளைக் கொடுக்கின்றன.

நியூட்டனின் இருமடி எதிர் விதியினின்று, சூரியனைச் சுற்றுகின்ற கோள்களெல்லாம் அதை ஒரு குவியமாகக் கொண்ட நீள் வட்டப்பாதையில் சுழல்கின்றன என்று காட்டலாம். சுற்றுப் பாதையில் சூரியனுக்கு அருகாமையிலிருக்கும் P என்ற புள்ளி

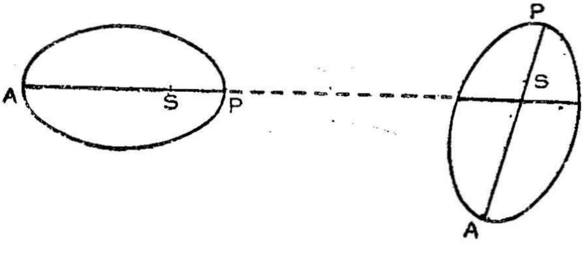
ஞாயிறு "அண்மை நிலை" (Perihelion) என்றும், அதற்கு வெகு தொலைவிலுள்ள A என்ற புள்ளி ஞாயிறு "சேய்மை நிலை" (Aphelion) என்றும் அழைக்கப்படுகின்றன. AP என்பது நீள் வட்டத்தின் பெரும அச்சு (Major Axis) ஆகும்.

நியூட்டனின் கொள்கைப்படி, சூரியனைச் சுற்றியுள்ள ஒரு குறிப்பிட்ட கோளின் நீள்வட்டப் பாதையின் பெரும அச்சு மாறாதிருக்க வேண்டும். ஆனால், சூரியனைச் சுற்றி இயங்குகின்ற பல்வேறு கோள்களினிடை நிலவும் ஈர்ப்பு விசையின் காரணமாகக் குறிப்பிட்ட ஒரு கோளின் பெரும அச்சு பல ஆண்டுகளுக்குப் பின்னர், படத்தில் காட்டியவாறு மாறுகின்றது, காட்டாகப் புதனின் நீள்வட்டப் பாதையின் பெரும அச்சு, ஒரு நூற்றாண்டில் 42·9 ரேடியன்கள் விலக்கமடைகின்றது. இந்த விலக்கத்தை விளக்க விண்ணியல் வல்லுநர்கள் எவ்வளவு முயன்றும் முடியவில்லை.

ஐன்ஸ்டீன் தன் ஈர்ப்புக் கொள்கையைப் பயன்படுத்தி இச் சிக்கலைத் தீர்த்தார். அவர் ஈர்ப்புக் கொள்கையை ஒட்டி, கோளின் இயக்கத்தை விளக்கும் சமன்பாட்டிற்கும் நியூட்டனின் சமன்பாட்டிற்கும் இடையேயுள்ள வேறுபாடு Σ என்பதனை,

$$\Sigma = \frac{6\pi m^2}{h^2} \qquad 2{\cdot}46$$

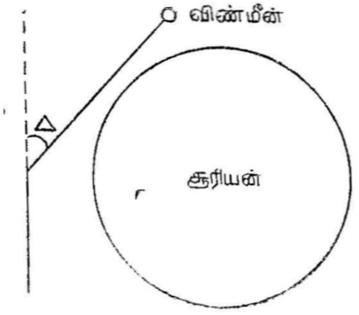
எனக் கண்டார். m, h ஆகியவற்றின் மதிப்புகளைச் சரியீடு செய்தால் $\Sigma = 43$ ரேடியன் ஆகிறது. ஐன்ஸ்டீனின் ஈர்ப்புக் கொள்கைக்கு உண்மையிலேயே இது ஒரு குறிப்பிடத்தக்க வெற்றியாகும்.



படம் 2·9.
ஒரு கோளின் நீள் வட்டப் பாதையின் பெரும அச்சின் மாற்றம்

2. ஈர்ப்பு விசைப்புலத்தால் ஒளிக்கதிர்கள் விலகல்

தனிச் சார்புக் கொள்கையின்படி பொருளின் சுழி இயக்க நிறை ஒரு குறிப்பிட்ட ஆற்றலுக்குச் சமமென்று கண்டோம். ஆனல், பொதுச் சார்புக் கொள்கையின்படி பொருளின் அமைதி நிலை நிறை அதன் ஈர்ப்பு நிறைக்குச் (Gravitational Mass) சமமானது. இதிலிருந்து $h\nu$ என்ற ஆற்றலைப் பெற்றிருக்கும் ஒரு சிப்பம் $h\nu/c^2$ என்ற அமைதி நிலை நிறை அல்லது ஈர்ப்பு நிறையைக் கொண்டிருக்கும். இதனல், சூரியனின் அருகாமையில் செல்லும் ஒளி, ஈர்ப்புப் புலத்தின் காரணமாக தன் பாதையினின்றும் சிறிது விலகல் வெண்டும்.



படம் 2·10.
ஈர்ப்பு விசைப் புலத்தால் ஒளிக்கதிர்கள் விலகல்

ஐன்ஸ்டீனின் கொள்கைப்படி இவ் விலக்கம்.

$$\triangle = 4 \times \frac{GM}{ac^2} \quad \ldots \quad 2{\cdot}47$$

என்ற சமன்பாட்டால் கொடுக்கப்பட்டிருக்கின்றது. இங்கு G என்பது ஈர்ப்பு மாறிலியையும், M என்பது சூரியனின் நிறையையும், a என்பது அதன் ஆரத்தையும், c என்பது ஒளியின் திசை வேகத்தையும் குறிக்கின்றன. Δ-ன் மதிப்பு ரேடியன்களில் பெறப்படுகின்றது. G, M, a, c ஆகியவற்றின் மதிப்புகளைச் சமன்பாடு (2·47)-ல் சரியிடு செய்தால் Δ-வின் மதிப்பு 1·74 ரேடியன்கள் ஆகிறது.

1919, 1922ஆம் ஆண்டுகளில் நிகழ்ந்த சூரியனின் முழுக் கிரகணத்தின்போது சோதனைகள் நடத்தப்பட்டு இவ் விலக்கத்தின் மதிப்பு கண்டுபிடிக்கப்பட்டது. இது ஏறத்தாழக் கணக்கீட்டின்படி கிடைத்த மதிப்பீட்டிற்குச் சமமாக இருந்தது குறிப்பிடத்தக்கது.

(ஊ) ஈர்ப்புப் புலத்தின் காரணமாக நிகழும் சிவப்பு நிற வரியின் இடப்பெயர்ச்சி

ஈர்ப்புப்புலம் அண்டத்தில் நிகழும் இயற்பியல் விளைவுகளைப் பாதிக்கிறதென்பது பொதுச் சார்புக் கொள்கையினால் விளக்கப்பட்டுள்ளது. இந்த ஈர்ப்புப் புலத்தின் காரணமாக, இயற்பியல் நிகழ்ச்சிகள் மெதுவாக நடக்க வேண்டும் என்றறியலாம். ஈர்ப்புப் புலத்தின் ஆற்றல் குறைவாக உள்ள நிலவின் மேற்பரப்பிலுள்ள ஒரு கடிகாரம் புவியிலுள்ள கடிகாரத்துடன் ஒப்பிட்டுப் பார்க்கும்போது மெதுவாக இயங்குவதால் காலஏற்பு (gain of time) அடைகிறதென்றும், சூரியனின் மேற்பரப்பிலுள்ள கடிகாரம் ஈர்ப்புப்புலத்தின் காரணமாக வேகமாக இயங்குவதால் கால இழப்பு அடைகிறதென்றும் காணலாம். கடிகாரங்களைக் கொண்டு இக் கால ஏற்பு-இழப்புகளை அறிய முடியாது எனினும் ஒரே மாதிரியான இரண்டு ஒளி மூலங்களிலிருந்து உமிழப்படும் ஒளியின் அதிர்வெண்களை ஒப்பிடுவதன் மூலம் இவற்றை அறியலாம்.

வலிமை பொருந்திய ஒரு ஈர்ப்புப்புலத்தில் ஒளி செல்லும்போது அதன் ஈர்ப்பு விசையை எதிர்த்து ஒளி சிப்பம் போல வேலை செய்வதால் அதன் ஆற்றல் குறைகிறது அல்லது அதன் நீளம் அதிகரிக்கின்றது. ஈர்ப்புப்புலம் மிகக் குறைவாக உள்ள புவியின் மூலங்களுடன் ஒப்பிடும்பொழுது சூரியனின் நிறமாலை வரிகள் மேற்கூறிய ஒளி விலகலின் விளைவாகச் சிவப்பு எல்லையை நோக்கி நகர்கின்றன. இந் நகர்வு சோதனைமூலம் நன்கு கணிக்கப்பட்டிருக்கிறது.

எனவே, ஒன்றோடொன்று பொருந்தாக் கருத்துக்களைக் கொண்டே பொதுச் சார்பு இயக்கத்தின் ஈர்ப்புக் கொள்கை சோதனை மூலம் உறுதிப்படுத்தப்பட்டிருக்கிறதென்று நாம் அறியலாம்.

வினாக்கள்

1. மைக்கல்சன்-மார்லி சோதனையை விவரித்து அதனின்று பெறப்பட்ட எதிரான முடிவுகளின் முக்கியத்துவத்தை விளக்குக.

2. தனிச் சார்புக் கொள்கையின் எடுகோள்கள் யாவை? இவற்றிலிருந்து லாரன்ட்ஸ் படிமாற்றச் சமன்பாடுகளைத் தருவி. நீளக்குறுக்கம், காலவிரிவு இவற்றை எவ்வாறு மேற்கண்ட படிமாற்றச் சமன்பாடுகளிலிருந்து பெறலாம்?

3. தனிச் சார்புக் கொள்கையின்படி எவ்வாறு இரண்டு திசை வேகங்கள் கூட்டப்படுகின்றன? சோதனைச் சாலையை பொறுத்து 0·9c திசைவேகம் கொண்ட இரண்டு துகள்கள் ஒன்றை நோக்கி ஒன்று இயங்குகின்றன என்றால் அவற்றின் சார்புத் திசை வேகம் என்ன?

4. துகள்களின் நிறைகள் எவ்வாறு அவற்றின் திசை வேகங்களைப் பொறுத்து அமைகின்றன என்பதை விளக்குக.

   0·95 c திசைவேகமுள்ள அணுத் துகளின் நிறையை அதன் அமைதி நிலை நிறையோடு ஒப்பிடுக.

5. ஓர் அணுத் துகள் $2{\cdot}5 \times 10^{-25}$ கி. கி. அமைதி நிலை நிறையைக் கொண்டுள்ளது.
   (i) அத் துகள் அமைதி நிலையிலிருக்கையில்
   (ii) 0·90c திசை வேகம் கொண்டு இயங்குகின்றபொழுது அதன் நிறை - ஆற்றல் எவ்வளவு இருக்கும்?

6. பொருளின் நிறை-ஆற்றல் சமத்துவம் என்றாலென்ன? ஐன்ஸ்டீன் நிறை-ஆற்றல் சமன்பாட்டைத் தருவி. 1 அ.நி.அ. = 981 மி.எ.வோ. என்பதைத் தருவி.

7. பொதுச் சார்புக் கொள்கை என்றாலென்ன? அக் கொள்கையினின்று பெறப்படும் முக்கியமான முடிவுகள் யாவை? இம் முடிவுகளை விளக்க நிகழ்த்தப்பட்ட சோதனைகளின் காட்சிப் பதிவுகள் யாவை?

3. இயற்கைக் கதிரியக்கத்தின் தன்மைகளும் பயன்களும்

3·1 கரு உறுதி நிலை

அணுக்கருக்களில் ஒரு சில கருக்கள் மட்டுமே கதிரியக்க மடைகின்றன; அநேக கருக்கள் கதிரியக்கமடையாமல் நிலையாக இருக்கின்றன. எடுத்துக்காட்டாக, கரி C^{14} கரு, கதிரியக்கத் தால் நைட்ரஜன் N^{14} கருவாக மாறுகின்றது, ஆனல் கரி C^{12} கரு கதிரியக்க மாறுதல் ஏதும் அடைவதில்லை. இதற்குக் காரணம் என்னவென்று பார்ப்போம். நாம் அணுக்கருக்களின் அமைப்பைப் பற்றிப் படித்தபொழுது அண்டத்தில் உறுதி நிலையிலேயே அநேக கருக்கள் இருக்கின்றன என்பதே கருவில் ஒரு பிணைப்பு விசை செயல்படுகிறது என்பதற்குச் சான்றாகும் என்று பார்த்தோம். அணுக்கரு ஒன்றில் புரோட்டான்களும் எலக்ட்ரான்களும் பிணைந்து கிடக்கின்றன என்றும் கண்டோம். கருவில் இரண்டு விசைகள் தொழிற்படுகின்றன.

1. கருவினுள், அடுத்தடுத்து இருக்கும் துகள் (புரோட்டான் அல்லது நியூட்ரான்) களுக்கிடையே தொழிற்படும் "கூழும் (கூழ் ஆகும்) விலக்கு விசை".

2. அடுத்தடுத்து இருக்கும் துகள்களுக்கிடையே தொழிற் படும் அணுக்கருப் பிணைப்பு விசை.

இவ் விரு விசைகளும் ஒன்றிற்கொன்று வேறுபட்டிருந்தால் கருக்கள் உறுதிநிலையில் இரா. எனவே உறுதி நிலையிலுள்ள எல்லாக் கருக்களிலும், கூழும் விலக்கு விசையைவிட அணுக்கரு பிணைப்பு விசை அதிக வலிமையோடு செயல்படுகிறதென்பது நன்கு விளங்கும்.

3·2 நியூட்ரான் புரோட்டான் தகவு

கருவில் அதிக எண்ணிக்கையுடைய புரோட்டான்கள் இருப் பின், அவற்றிற்கிடையே தொழிற்படும் கூழும் விலக்கு விசையும்

அதிகமாகும். எனவே கருவின் உறுதிநிலை குறைந்துவிடும். எனவே, கருவில் புரோட்டான்களோடு எலக்ட்ரான்களும் இருக்க வேண்டும். அன்றியும் இவற்றிற்கிடையே தொழிற்படும் ஈர்ப்பு விசையின் காரணமாக, கருவின் உறுதிநிலை அதிகமாகும். ஆனல், நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கையானது புரோட்டான்களின் எண்ணிக்கையைவிட மிக அதிகமாக இருந்தாலும், கருவின் உறுதிநிலை பாதிக்கப்படுகின்றது. இதன் காரணத்தைப் பின்புப் பார்ப்போம். எனவே, அணுக் கருவிலுள்ள புரோட்டான்களின் எண்ணிக்கைக்கும் நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கைக்குமுள்ள தகவு ஒரு குறிப்பிட்ட மதிப்பிற்குள்ளே இருந்தால்தான் கருக்கள் உறுதிநிலையிலிருக்கும். தனிம அட்டவணையின் முதலிலுள்ள அணுக்கருக்கள் சிலவற்றுள், நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கையானது புரோட்டான்களின் எண்ணிக்கைக்குச் சமமாக இருப்பதால்தான் அவை உறுதிநிலையில் உள்ளன. எடுத்துக் காட்டாக, ஹீலியம் – 4_2He^4 $(2n + 2p)$, கரி – $2_6\ c^{12}$ $(6n+6p)$, ஆக்ஸிஜன் – $16\ _8O^{16}$ $(8n + 8p)$, நீயான் – $20_{10}Ne^{20}$ $(10n+10p)$ போன்ற கருக்கள் அதிக உறுதிநிலையிலுள்ளன. இக் கருக்களில் நியூட்ரான் புரோட்டான் தகவு ஒன்றுக உள்ளது. சில தனிமங்களின் நீயூட்ரான் புரோட்டான் தகவு (n-p தகவு), கீழ்க் கண்ட அட்டவணையில் கொடுக்கப்பட்டுள்ளது.

3·1 அட்டவணை

நியூட்ரான் புரோட்டான் தகவு

எண்	அணுக்கரு	நி—பு (n—p) தகவு
1	$_2He_2{}^4$	1 : 1
2	$_{20}Ca_{20}{}^{40}$	1 ; 1
3	$_{38}Sr_{52}{}^{90}$	1·37 ; 1
4	$_{54}Xe_{80}{}^{134}$	1·48 : 1
5	$_{92}U_{146}{}^{238}$	1·58 : 1

அணு எண் z-ன் மதிப்பு அதிகமாக அதிகமாக, கூடலும் விலக்கு விசையும் அதிகமாகின்றது. இதனைச் சரியீடு செய்ய அணுக்கரு விசையை, நியூட்ரான்களைக் கொண்டு அதிகப்படுத்த

வேண்டும். இப்பொழுது நியூட்ரான்-புரோட்டான் தகவின் மதிப்பு ஒன்றிற்கு மேல் அதிகமாகிறது. பிஸ்மத் Bi^{209} தனிமம் வரையில் இது அதிகரித்துக்கொண்டே சென்று 1·5 மதிப்பை அடைகிறது. உறுதி நிலையைக் கொடுக்கும் நியூட்ரான்-புரோட்டான் தகவு ஒரு குறிப்பிட்ட மதிப்பு உடையதாக இல்லாமல் ஒரு சிறிய அளவு நெருக்கத்தைக் கொண்டிருக்கிறது. ஒற்றைப்படை அணு எண் z கொண்ட அணுக்கருக்களெல்லாம் ஒன்று அல்லது இரண்டு ஐசோடோப்புகளைத்தான் கொண்டுள்ளன. ஆனால், இரட்டைப்படை அணு எண் z கொண்ட கருக்களெல்லாம் அனேக ஐசோடோப்புகளைக் கொண்டிருக்கின்றன. எனவே, நியூட்ரான்-புரோட்டான் தகவானது, இரட்டைப்படை அணு எண் z கொண்ட கருக்களுக்கெல்லாம் அதிகம் எனலாம். எடுத்துக்காட்டாக வெள்ளீயம் ($z = 50$), அணு எண் $A = 112$ முதல் 120 வரை உள்ள, உறுதி நிலையிலுள்ள ஐசோடோப்புகளைக் கொண்டிருக்கின்றன. வெள்ளீயத்திற்கு நி-பு தகவு 1·25 முதல் 1·48 வரை உள்ளது. இருப்பினும், ஒற்றைப்படை அணு எண் z கொண்ட, அடுத்தடுத்த தனிமங்களான இண்டியம் ($z = 49$), ஆண்டிமனி ($z = 51$) இவற்றின் நி-பு தகவு 1·31 முதல் 1·35 வரையிலும், 1·37 முதல் 1·41 வரையிலும் உள்ளன.

மேற்கண்ட உண்மைகளிலிருந்து இலேசான தனிமங்களிலிருந்து கனமான தனிமங்களுக்குச் செல்லும்போது, அணுக்கருக்களின் நியூட்ரான்-புரோட்டான் தகவு அதிகமாவதைக் காண்கிறோம். இத் தகவின் பெரும மதிப்பு 3 : 2 வரை உள்ளது. உறுதி நிலையிலுள்ள. அணுக்கருக்களில் நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கை, புரோட்டான்களின் எண்ணிக்கைக்குச் சமமாக உள்ளது. இதன் பின் கருக்களிலுள்ள நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கை அதிகமாகும் போது, புரோட்டான்களுக்கிடையே தொழிற்படும் கூழும் எதிர்ப்பு விசையை, இந்த நியூட்ரான்களுக்கிடையே தொழிற்படும் ஈர்ப்பு விசையே சரி செய்கிறது எனலாம். எனவே, நியூட்ரான்-புரோட்டான் தகவின் மதிப்பு ஒன்றாக இருக்கும் அணுக்கருக்களின் தன்மை, இந் தகவின் மதிப்பு ஒன்றிற்கும் மேலாக இருக்கும் அணுக்கருக்களின் தன்மையினின்றும் மாறுபட்டிருக்கும் என்றும் அறியலாம். மேலும் இத் தகவின் மதிப்பு அதிகமாக உள்ள அணுக்கருக்கள் நிலையற்றதாய், ஒன்றோ அல்லது ஒன்றிற்கும் மேற்பட்ட துகள்களையோ வெளியேற்றி, உறுதிநிலைக்கு வருவதோடு, நியூட்ரான்-புரோட்டான் தகவையும் குறைத்துக்கொள்கின்றன. இதன் காரணமாகத்தான் தற்செயலாக சில தனிமங்களில் கதிரியக்கம் ஏற்படுகிறது.

3·3 அணுக்கருக்களின் மலிவு

உறுதிநிலையிலுள்ள வெள்ளியத்தின் ஐசோடோப்புகளின் எண்ணிக்கையையும், இண்டியம், ஆண்டிமனி ஆகிய தனிமங்களின் ஐசோடோப்புகளின் எண்ணிக்கையையும் கவனிக்குமிடத்து, மற்றுமோர் உண்மை புலனாகின்றது. இரட்டைப்படை புரோட்டான் அல்லது நியூட்ரான் எண்களை உடைய தனிமங்கள் அதிக உறுதி நிலையிலிருக்கின்றன. காட்டாக $_{50}Sn$, 11 உறுதி நிலையிலுள்ள ஐசோடோப்புகளைக் கொண்டிருக்கின்றது. காட்மியம் $_{48}Cd$ தனிமமும், டெலிரியம் $_{50}Te$ தனிமமும், ஒவ்வொன்றும், 8 உறுதி நிலையிலுள்ள ஐசோடோப்புகளைக் கொண்டிருக்கின்றன. ஆனால் வெள்ளி $_{47}Ag$, இண்டியம் $_{49}In$, ஆண்டிமனி $_{57}Sb$ போன்ற தனிமங்கள் ஒவ்வொன்றும் இரண்டு ஐசோடோப்புகளைத்தான் கொண்டுள்ளன. ரோடியம் $_{45}RL$ தனிமமும், இண்டியம் $_{53}I$ தனிமமும் ஒரே ஒரு ஐசோடோப்பைத்தான் கொண்டுள்ளன. உறுதிநிலையிலுள்ள அயோடின் $_{55}I$ தனிமத்தில் 74 நியூட்ரான்களும், ரோடியம் $_{45}Rh$ தனிமத்தில் 58 நியூட்ரான்களும் உள்ளன. இண்டியம் $_{49}In$ தனிமம் 64, 66 நியூட்ரான்களைக் கொண்டுள்ளது. இத் தொகுதியில் அணு எண் Z-ன் மதிப்பும், நியூட்ரான் எண் N-ன் மதிப்பும் ஒற்றைப்படையாக உள்ள ஓர் அணுக்கருவும் உறுதிநிலையில் இல்லை என்பது கவனிக்கத் தக்கது. Z-ம், N-ம் ஒற்றைப்படையாக உள்ளன. உறுதிநிலையிலுள்ள அணுக்கருக்கள் மொத்தம் ஒன்பதே. இவற்றுள் நான்கு, மிகக் குறைந்த அணு நிறை எண் மதிப்பு கொண்டுள்ளவை. ஹீலியம் IH', லிதியம் $_3Li^6$, போரான் $_5B^{10}$ நைட்ரஜன் $_7N^{14}$. மீதி ஐந்தும் (கிரிப்பான் $_{19}K^{40}$, வனேடியம் $_{23}V^{50}$, லாந்தேனம் $_{57}La^{138}$, லூடெசியம் $_{71}Lu^{176}$, டாலியம் $_{73}Ta^{180}$) குறைந்த அளவில்தான் இயற்கையில் கிடைக்கின்றன. காட்டாக அணுநிறை எண் $A=50$ கொண்ட வனேடியம் என்கிற தனிமம், இயற்கையில் 0·24 விழுக்காடே உள்ளது. வெவ்வேறு Z, N மதிப்புக் கொண்ட, உறுதிநிலையிலுள்ள அணுக்கருக்களின் எண்ணிக்கை அட்டவணை (3·2)-ல் கொடுக்கப்பட்டுள்ளது. இவ்வட்டவணையிலிருந்து இரட்டைப்படை Z, N மதிப்பு கொண்ட தனிமங்கள்தாம் அதிக உறுதிப்பாடு கொண்டுள்ளன என அறியலாம்.

புரோட்டோன்களும் நியூட்ரான்களும் ஒன்றோடொன்று இரட்டைகளாகப் பிணைக்கப்படுவதால்தான், அவற்றின் உறுதி நிலை அதிகரிக்கிறது என்று கூறின் அது மிகையாகாது. இப் பிணைப்பு அணுக்களிலும், மூலக் கூறுகளிலும் எலக்ட்ரான்கள் இரட்டைகளாகப் பிணைந்திருப்பதற்கு ஒப்பாக இருக்கிறது.

காட்டாக, கரு ஒன்றில் இரட்டைப்படை எண்ணிக்கையுள்ள புரோட்டான்கள் இருந்தால், இப் புரோட்டான்களெல்லாம் இரட்டைகளாகப் பிணைவுற்றிருப்பதாகக் கொள்ளலாம். ஆனால் புரோட்டான்களின் எண்ணிக்கை ஒற்றைப்படையாக இருந்தால், இரட்டைகளாகப் பிணைவுற்றவைபோக, ஒரு புரோட்டான் பிணைவுறுது எஞ்சி நிற்கும். எனவே, இப் புரோட்டான் வேறு கருவிலுள்ள துகள்களோடு செயலீடு நிகழ்த்துவதற்குத் தயாராக உள்ளதே கருவின் உறுதிநிலை குறைவதற்குக் காரணம் எனலாம்.

3·2 அட்டவணை

அணுக்கருக்களின் மலிவு

எண்	மாதிரி	எண்ணிக்கை
1	ஒற்றைப்படை N — ஒற்றைப்படை Z	9
2	ஒற்றைப்படை N — இரட்டைப்படை Z	56
3	இரட்டைப்படை N — ஒற்றைப்படை Z	53
4	இரட்டைப்படை N — இரட்டைப்படை Z	165

3·4 இயற்கைக் கதிரியாக்கத்தின் கண்டுபிடிப்பு

பொருள்களில் X கதிர்கள் எவ்வாறு "ஒளிர்வை" உண்டாக்குகின்றன என்பதைக் குறித்தும், X கதிர்களின் செறிவிற்கும், அவை பொருள்களில் உண்டாக்கும் ஒளிர்விற்கும் இடையேயுள்ள தொடர்பைப் பற்றியும் ஆராய்ந்தறியும்பொருட்டு 1896 ஆம் ஆண்டு பெக்யூரெல் என்ற பிரெஞ்சு விஞ்ஞானி பல சோதனைகளை நிகழ்த்தினர். யுரேனியம் உப்பு ஒன்றோடு ஒரு புகைப்படத் தகட்டை வைத்தபொழுது, அது கருமையடைவதை அவர் தற்செயலாகக் கவனித்தார். பல்வேறு நுண்ணிய சோதனைகளுக்குப் பிறகு, ஒளிப்படத்தகடு கருமையடைவதற்கு X கதிர்களோ அவை பொருள்களில் உண்டாக்கும் ஒளிர்தலோ காரணம் அல்ல என்றும், அது யுரேனியம் தனிமத் திறனுடைய சிறப்பான ஒரு பண்பினால்தான் ஏற்படுகிறதென்றும் முடிவு செய்தார். புகைப் படத் தகடு கருமை அடைவதன் காரணம், யுரேனியத்திலிருந்து உமிழப்படும் ஒரு வகைக் கதிரியக்கந்தான் என்பது இப்பொழுது நன்கு தெரிந்த உண்மை.

3·5 இயற்கைக் கதிரியக்கத்தின் பண்புகள்.

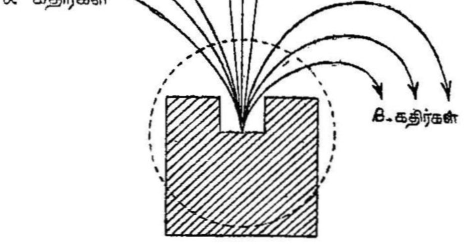
இயற்கைக் கதிரியக்கம் ஒரு சில கனமான தனிமங்களி லிருந்துதான் நிகழ்கிறது. இத் தனிமங்களானவை, அழுத்தம், வெப்பநிலை ஆகிய புறக் கட்டுபாடுகளுக்கு அப்பாற்பட்டுத் தன்னிச் சையாகச் சில கதிர்களை உமிழ்கின்றன. இவ்வாறு உமிழப் படும் கதிர்கள் X கதிர்களைப் போன்று ஒளி புகாப் பொருள் களில் ஊடுருவிச் செல்லும் தன்மை வாய்ந்தவை; X-கதிர் களைப் போலவே, காற்று மற்றும் இதர வாயுக்களின் வழியாக மின்சாரம் பாய்வதற்கு வழிசெய்யும் இயல்புடையவை. இக் கதிரியக்கத்தின்போது ஒரு தனிமம் வேறொரு தனிமமாக மாறு கிறது எனலாம். இது வேதியல் மாறுதல்களைப் போலவே, வெப்பநிலை, அழுத்தம் முதலியவற்றால் பாதிக்கப்படுவதில்லை. வேதியல் மாறுதல்கள் கருக்களைச் சுற்றி இயங்கிக்கொண்டி ருக்கிற எலக்ட்ரான்களால் ஏற்படுகின்றன. ஆனால், கதிரியக்க மாற்றங்கள் அணுக்கருவின் உள்ளேயே நிகழ்கின்றன. கருக் களின் பிணைப்பு ஆற்றல், செயலீட்டு ஆற்றல், முதலியவை வேதியல் மாற்றங்களின் ஆற்றல்களைவிட மிக அதிகமாதலால், கருவிடை நிகழும் மாற்றங்கள் வெளிப்புறத் தன்மைகளைப் பொறுத்திரா என்பது நன்கு விளங்கும்.

பெக்யூரலுக்குப் பிறகு, ரூதர்போர்டு என்ற ஆங்கில விஞ்ஞானி, கதிரியக்கப் பொருள்களைப் பற்றியும், அவை உமிழ்கின்ற கதிர்களின் பண்புகளைப் பற்றியும் ஆராயத் தொடங் கினார். பண்புகளில் ஒன்றிற்கொன்று மாறுபட்ட இரண்டு வகைக் கதிர்கள் இப் பொருள்களிலிருந்து வெளியேறுவதை அவர் கண்டார். இவற்றில் முதல் வகைக் கதிர்கள் இரண்டாவது வகைக் கதிர்களைவிடப் பொருள்களில் அதிக அளவு ஊடுருவும் சக்தி வாய்ந்தவையாக இருந்தன. குறைந்த அளவில் ஊடுருவு கின்ற கதிர்களை 'α-கதிர்கள்' எனவும், அதிக அளவில் ஊடுருவும் கதிர்களை 'β-கதிர்களெனவும்' அவர் அழைத்தார். சில ஆண்டு களுக்குப் பிறகு β-கதிரிலுள்ள துகள்களின் மின்னூட்டத்திற்கும், பொருண்மைக்குமுள்ள தகவு (e/m), எதிர் மின்வாய்க் கதிரி லுள்ள துகள்களின் (e/m) தகவிற்குச் சமமாக இருக்கிறதென்று கண்டறியப்பட்டது. இப்பொழுது, β-கதிர்கள் அதிக திசை வேகங்கள் கொண்ட எலக்ட்ரான்களே என்று ஐயமற உண்மைப் படுத்தப்பட்டிருக்கிறது.

α, β கதிர்களைத் தவிர, மற்றுமொரு வகைக் கதிர்கள் இயற்கைக் கதிரியக்கத்தில் உமிழப்படுகின்றன என்பதை 1900-ம் ஆண்டில் வில்லார் (Villard) என்ற பிரெஞ்சு விஞ்ஞானி

கண்டுபிடித்தார். இக் கதிர்கள் α, β கதிர்களைப் போலல்லாமல், காந்தப் புலங்களாலும், நிலையின் புலங்களாலும் வளைவுறுவதில்லை. இவை γ கதிர்கள் என்று அழைக்கப்பட்டன. இக் கதிர்களின் ஆற்றல்களை இவை உண்டாக்கும் ஃபோட்டோ-எலக்ட்ரான்களின் ஆற்றல்களிலிருந்து தருவிக்கலாம். இவை X கதிர்களைப் போன்று விளிம்பு வளைவிற்கு உள்ளாகின்றன. இவற்றின் அலை நீளங்கள் 0·5 ஆங்ஸ்ட்ராம் அலகுகளிலிருந்து 0·05 ஆங்ஸ்ட்ராம் அலகுகள் வரை உள்ளன.

இயற்கைக் கதிரியக்கத்தில் மூன்று வகைக் கதிர்கள் உமிழப்படுகின்றன என்பதைக் கீழ்க்கண்ட சோதனையிலிருந்து அறியலாம். காரீயப் பாளமொன்றில் செங்குத்தாக ஒரு துளை செய்து அதில் கதிரியக்கமுடைய தனிமத்தாலான உப்பை வைத்தால் (எடுத்துக்காட்டாக யுரேனியம் உப்பை வைத்தால்), உமிழப்படும் கதிர்களெல்லாம், தடிப்பான ஈயப்பாளத்தின் வழியாகச் செல்லாமல், அதிலுள்ள துளை வழியாகச் செல்லும். இக் கதிர்கள் காற்றிலுள்ள வாயுக்களை அயனிகளாக மாற்ற வல்லவையாதலால், காரீயப் பாளமானது வெற்றிடமான ஒரு பெட்டகத்தில் வைக்கப்படவேண்டும். இப்பொழுது படம் (3·1)-ல் காட்டியபடி, கற்றைகள் செல்லும் திசைக்கும், காகிதத்தின் மேற்பரப்பிற்கும் செங்குத்தாக ஒரு காந்தப் புலத்தை அமைத்தால், வெவ்வேறு கதிர்கள் வெவ்வேறு திசைகளில்



படம்- 3·1.
காந்தப்புலத்தில் α, β, γ-கதிர்கள்

வளைவுறுகின்றன. இம் மூன்றில் ஒருவகைக் கதிர்கள் படத்தில் காட்டியபடி காந்தப்புலத்தினால் எந்த விதத்திலும் பாதிக்கப் படுவதில்லை. மற்ற இருவகைக் கதிர்கள் எதிரெதிர்த் திசைகளில் வளைவுறுகின்றன.

மேலே, படத்தில் காட்டியிருப்பதுபோல், குறைந்த அளவில் இடது புறமாக வளைந்திருக்கும் கதிர்கள் α-கதிர்களாகும். வலது பக்கமாக இன்னுஞ் சிறிது அதிக அளவில் வளைந்திருப்பவை β-கதிர்களாகும், காந்தப்புலத்தில் பாதிக்கப்படாமல் நேர்க் கோட்டில் செல்பவை γ-கதிர்கள்.

கதிரியக்கத்தின்போது உமிழப்பெறும் α-கதிர்களை, அவை வாயுக்களில் உண்டாக்குகிற அயனிகளின் நிறைமாலையை ஆய்ந்து, ருதர்போடும், ராய்ட்ஸும், அவை ஹீலியம் தனிமத்தின் அணுக் கருக்களே என்று புலப்படுத்தினார்கள். இவை ஓரலகு மின்னூட்டமும், நான்கு அணுநிறை எண் அலகும் கொண்டவை என்று கண்டார்கள். β-கதிர்களின் மின்னூட்டத்திற்கும், அவற்றின் பொருண்மைக்குமுள்ள தகவைக் (e/m) கண்டுபிடித்ததில், அது எலக்ட்ரான்களின் மின்னூட்டத்திற்கும் பொருண்மைக்குமுள்ள தகவிற்குச் சமமாக இருந்ததென அறிந்தார்கள். இதிலிருந்து, β-கதிர்கள், ஓர் எலக்ட்ரான் மின்னூட்டம் உடையவை என்றும், α-கதிர்களோடு ஒப்பிட்டுப் பார்க்கும் போது அவற்றின் பொருண்மை மிகக்குறைவு என்றும், எனவே α-கதிர்களைக் காட்டிலும் அதிக திசைவேகம் கொண்டவை என்றும் கண்டார்கள். γ-கதிர்களானவை, X-கதிர்களைப் போன்ற மின்காந்த அலைகளெனவும், ஆனால் அவற்றைவிட மிகக் குறைந்த அலைநீளம் கொண்டவை எனவும் கண்டார்கள்.

(அ) α கதிர்களின் பண்புகள் :

1. துத்தநாகச் சல்பைடு போன்ற கூட்டுப்பொருள்களில் α-கதிர்கள் ஒளிர்தலை (Fluorescence) உண்டாக்குகிறன. துத்தநாகச் சல்பைடு பூசப்பட்ட ஒரு மெல்லிய கண்ணடித் தட்டில் இவை படுகின்றபொழுது ஒளிர்தல் ஏற்படுகிறது. இந்த ஒளிர்தலை நுண்ணோக்கி கொண்டு பார்க்கபோது, இது சீராக இல்லாமல், விட்டுவிட்டு அங்கங்கே காணப்படுகிறது. எனவே α-கதிர்கள் எண்ணக்கூடிய அளவில் வெளிவருகின்றன என்பது விளங்கிறது.

2. α-துகள்கள் நேர் மின்னூட்டம் கொண்டவை. இவற்றின் மின்னூட்டத்தையும், மின்னூட்டம்-பொருண்மை ஆகியவற்றின் தகவையும் கண்டபொழுது, இவை இருமுறை அயனியாக்கம்

பெற்ற ஹீலியம் அணுவே என்பது விளங்குகிறது. இவை ஈரலகு எலக்ட்ரான் மின்னூட்டமும், அணுநிறை எண் நான்கும் கொண்டவை.

3. வாயுக்களில், α-கதிர்கள் பெருமளவிற்கு அயனியாக்கம் தோற்றுவிக்கும் வலிமை வாய்ந்தவை.

4. இவை பொருள்களால் உட்கவரப்படுகின்றன. 0·01 செ. மீ தடிமன் கொண்ட அலுமினியத்தகடு, α-துகள்களை முற்றிலும் கவரக்கூடும்.

5. உலோகத் தாள்களின் வழியாக α-கதிர்கள் செல்லும் போது சிதறுகின்றன.

6. அணுக்களில் இவை செயற்கைச் சிதைவை உண்டாக்கு கின்றன.

7. α-கதிர்கள், எலக்ட்ரான்களைப் போன்று பன்மடங்கு நிறைகொண்டு, அதிகத் திசை வேகங்களோடு இயங்குவதால், இவை அணுக் கருக்களோடு மோதி செயற்கைக் கரு மாற்றத்தை உண்டாக்குவதற்குப் பயன்படுத்தப்படுகின்றன.

(ஆ) β-கதிர்களின் பண்புகள்

1. காந்தப்புலம், நிலைமின்புலம் ஆகியவற்றால் β-கதிர்களில் ஏற்படும் விலக்கத்தை ஆய்கின்றபொழுது, இவை எதிர்மின் னூட்டம் கொண்டவை என அறியலாம். இவற்றின் மின்னூட் டத்திற்கும் பொருண்மைக்குமுள்ள தகவிலிருந்து இவை ஏறத் தாழ ஒளியின் திசைவேக அளவிற்குத் திசைவேகம் கொண்ட எலட்க்ரான்களே என்று முடிவு செய்யலாம்.

2. ஒரே திசைவேகம் கொண்ட α - துகள்களைக்காட்டிலும் இவை சிறிய அளவிற்கு ஆற்றல் பெற்றிருப்பதால், α-துகளைவிட மிகக் குறைந்த "அயனியாக்குத் திறனையே" (ionising power) இவை பெற்றுள்ளன எனலாம்.

3. β - துகள்கள் அணுக் கருவிலிருந்து தோன்றுகின்றன. அணுச் சிதைவின்போது ஏற்படும் β-துகள் அணுக் கருவின் வெளியேயுள்ள எலக்ட்ரான்களோடு மோதுகின்றபொழுது γ-கதிர்கள் உண்டாகின்றன.

4. β-கதிர்கள், α-கதிர்களைக் காட்டிலும் அதிக அளவிற்குப் பொருள்களில் ஊடுருவும் தன்மை வாய்ந்தவை. இவை 0·5

செ.மீ தடிமனுள்ள அலுமினியத் தகட்டினல் முற்றிலும் உட்கவரப் படுகின்றன.

(இ) γ-கதிர்களின் பண்புகள்

1. γ-கதிர்கள், X-கதிர்களைப் போன்ற மின்காந்த அலைகளே. ஆனால், இக் கதிர்களின் அலைநீளங்கள் X-கதிர்களின் அலைநீளங் களைவிட மிகக் குறைந்தவை.

2. γ-கதிர்கள் பொருள்களில் அதிக அளவிற்கு ஊடுருவிச் செல்லும் தன்மை வாய்ந்தவை. அநேக செ. மீட்டர் தடிப்புள்ள காரீயப் பாளங்களினூடே ஊடுருவிச் செல்லும் அளவிற்கு அதிக ஆற்றல் வாய்ந்தவை. இவற்றின் அயனியாக்குத் திறன் மிகக் குறைவு.

3. X-கதிர்களைப் போலவே γ-கதிர்களும் படிகங்களின் தளங்களில் எதிரொளிப்பு அடைகின்றன. இந்த எதிரொளிப்பை ஆராய்ந்து γ-கதிர்களின் அலைநீளங்களைக் கண்டறியலாம்.

4. எவ்வாறு எதிர்மின்வாய்க் கதிர்கள் பொருள்களில் நிறுத்தப்படும்போது X-கதிர்கள் உண்டாகின்றனவோ, அவ் வாறே கதிரியக்கமுடைய பொருள்களில் β-கதிர்கள் நிறுத்தப் படும்போது γ-கதிர்கள் உண்டாகின்றன.

5. γ-கதிர்கள் புகைப்படத் தகட்டில் 'ஒளிர்தலை' (Fluresecence) உண்டாக்குகின்றன.

6. இவை பொருள்களின்மீது விழுகின்றபொழுது, கீழ்க் கண்ட e-ன் மடிச்சமன்பாட்டின்படி உட்கவரப்படுகின்றன.

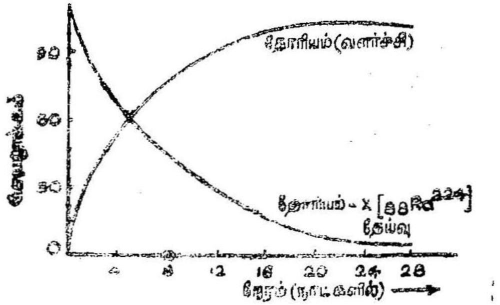
$$I = I_0 e^{-pt} \quad \dots \quad (3\cdot1)$$

இதில் I_0 என்பது γ-கதிர்களின் தொடக்கச் செறிவையும், I என்பது t தடிமனுள்ள பொருளின் வழியாகக் கதிர்கள் ஊடு ருவிச் சென்றபின் இருக்கும் செறிவையும், p என்பது பொருளின் உட்கவர்திறனையும் குறிப்பிடுகின்றன.

3·6 இயற்கைக் கதிரியக்கத் தேய்வு விதிகள்

முதன் முதலாக, வேதியல் முறையில் தோரியம் X (ரேடியம் 224) ஆனது, தோரியம் தனிமத்திலிருந்து பிரித்தெடுக்கப்பட்ட பொழுது, தோரியம்-X அதிகச் செயலூக்கத்தையும், தோரியம் மிகக் குறைந்த அளவு செயலூக்கத்தையும் கொண்டிருந்தன.

ஆனால், காலம் செல்லச் செல்ல, தோரியம்-X தனிமத்தின் செயலூக்கம் குறையவும், தோரியத்தின் செயலூக்கம் அதிகமாகவும் முற்பட்டன. தோரியம்-X எந்த அளவிற்குத் தன் செயலூக்கத்தை இழந்ததோ, அந்த அளவிற்குத் தோரியத்தின் செயலூக்கம் அதிகமாயிற்று. இதை ருதர்போர்டும், சாடியும் கண்டறிந்தார்கள். இவை படம் 3·2-ல் காட்டப்பட்டுள்ளன. இந்த இரண்டு கோடுகளும் e-ன் மடிக் கோடுகளாக இருந்தன.



படம் 3·2
தோரியம் X, தோரியம் இவற்றின் தேய்வும், வளர்ச்சியும்

இவர்கள் கதிரியக்கத் தேய்வின்போது ஏற்படும் ஒருவகை அணுக்களின் செயலூக்கத்தின் குறைவு அவ் வகை அணுக்களின் செயலூக்கங்களுக்கு நேர்விகிதத்தில் அமைகிறது எனக் கண்டார்கள். அதாவது

$$-\frac{dA}{dt} \propto A$$

இதில், எதிர்க்குறி செயலூக்கக் குறைவையும், A என்பது செயலூக்கத்தையும் காண்பிக்கின்றன.

$$\text{அல்லது} \quad \frac{dA}{dt} = -\lambda A \qquad \ldots \quad (3{\cdot}2)$$

இதில் 'λ' என்பது ஒரு மாறிலி.

செயலூக்கமானது கதிரியக்கப் பொருளிலுள்ள அணுக்களின் எண்ணிக்கையைப் பொறுத்திருப்பதால்

$$\frac{dA}{dt} = \frac{dN}{dt}$$

அல்லது $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$ ... (3·3)

என்று ஆகின்றது.

N என்பது கதிரியக்கப் பொருளிலுள்ள அணுக்களின் எண்ணிக்கை.

இந்தப் பகுதிச்சமன்பாட்டிற்குத் தொகுதி காணில்

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

$$\int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt.$$

$\log N = -\lambda t +$ மாறிலி ... (3·4)

$t = 0$ ஆக இருக்கும்போது, கதிரியக்கப் பொருளில் இருந்த மொத்த அணுக்களின் எண்ணிக்கையை No எனக் கொண்டு $(N = No)$ இதைச் சமன்பாடு (3·4)-ல் சரியீடு செய்தால்

$\log No =$ மாறிலி (3·5)

என்பது பெறப்படுகின்றது.

(3·4), (3·5) சமன்பாடுகளிலிருந்து

$$\log N = -\lambda t + \log No$$

அல்லது $\log N - \log No = -\lambda t$

அதாவது $\log\left(\frac{N}{No}\right) = -\lambda t$

அல்லது $N = N_0 e^{-\lambda t}$ ... (3·6)

என்ற சமன்பாடு கிடைக்கிறது.

மேற்கண்ட சமன்பாட்டில் 'λ' என்பது ஒரு மாறிலி. இது கதிரியக்கப் பொருளின் 'கதிரியக்கச் சிதைவு மாறிலி' என அழைக்கப்படுகிறது. வெவ்வேறு அணுக்கள் வெவ்வேறு கால அளவுகளில் தேய்வுறுவதால் இச் 'சிதைவு மாறிலி' வெவ்வேறு கதிரியக்கங்களுக்கு வெவ்வேறாக அமைகிறது. அணுக்கள் தேய்வுறும் கால அளவுகள் 10^{-6} செகண்டிலிருந்து அநேக மில்லியன் ஆண்டுகள் வரை உள்ளதால், அணுக்கள் தேய்வுறுகின்ற நேரங்களைக் கணக்கிடுவதற்கு ஒரு கால அளவை அமைத்துக்கொள்வது அவசியமாகிறது.

கதிரியக்கப் பொருள்களின் 'அரை வாழ்வுக் காலமும்,' 'சராசரி வாழ்வுக் காலமும்'

அரை வாழ்வுக் காலம்

கதிரியக்கத்தின் தொடக்கத்தில் No அணுக்கள் இருந்தன என்று கொள்வோம். ஒரு குறிப்பிட்ட நேரத்தில் இந்த No அணுக்களில் ஒரு பாதி கதிரியக்கத் தேய்வு அடைந்ததாகக் கொள்வோம். (எஞ்சி இருக்கும் அணுக்களின் எண்ணிக்கை No/2. இந்தக் கால அளவு அணுக்களின் 'அரை வாழ்வுக் காலம்' என்று அழைக்கப்படுகின்றது.

ஒரு கதிரியக்கப் பொருளானது எந்தக் கால அளவில் தன் நிறையில் சரிபாதியைக் கதிரியக்கத்தினல் இழக்கின்றதோ அந்தக் கால அளவு அப் பொருளின் "அரை வாழ்வுக் காலம்" என்று வரையறுக்கப்படுகின்றது.

சமன்பாடு 3·6-ன் படி $N = N_o e^{-\lambda t}$

$t = T_{\frac{1}{2}}$ ஆகும்போது $N = \dfrac{No}{2}$.

இதை மேற்கண்ட சமன்பாட்டில் சரியீடு செய்தால்,

$$\frac{No}{2} = N_o e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}}$$

$$\text{அல்லது } e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}} = \tfrac{1}{2}$$

$$e^{\lambda T_{\frac{1}{2}}} = 2$$

$$\lambda T_{\frac{1}{2}} = \log_e 2 = ln\ 2$$

$$\therefore\ T_{\frac{1}{2}} = \frac{ln\ 2}{\lambda}$$

$$\text{அதாவது } T_{\frac{1}{2}} = \frac{ln\ 2}{\lambda} = \frac{0{\cdot}6931}{\lambda} \qquad \ldots \quad (3{\cdot}7)$$

கதிரியக்கப் பொருள்களின் 'அரை வாழ்வுக் காலங்கள்' வெவ்வேறு பொருள்களுக்கு வெவ்வேறாக இருக்கின்றன. α-கதிர்களை உமிழும் பொலோனியம்—212. (Po^{212}) கருவின் அரை வாழ்வுக் காலம் 3×10^7 செகண்டுகள், ஆனல், அதே கதிரியக்கத்

தொடரிலிருக்கும் தோரியத்தின் அரை வாழ்வுக் காலம் $1{\cdot}39 \times 10^{10}$ ஆண்டுகள். இதிலிருந்து பொருள்களின் அரை வாழ்வுக் காலங்கள் எந்த அளவிற்கு வேறுபட்டிருக்கின்றன என்பதை ஒருவாறு அறியலாம்.

கதிரியக்கப் பொருள்களின் அரை வாழ்வுக் காலங்களைச் சோதனை மூலம் கண்டறிதல்

Nt என்பதைக் கதிரியக்கம் ஆரம்பிக்கின்றபொழுது, கதிரியக்கப் பொருளிலுள்ள அணுக்கருக்களின் எண்ணிக்கை என்று கொண்டால், சமன்பாடு (3·6)-ன் படி

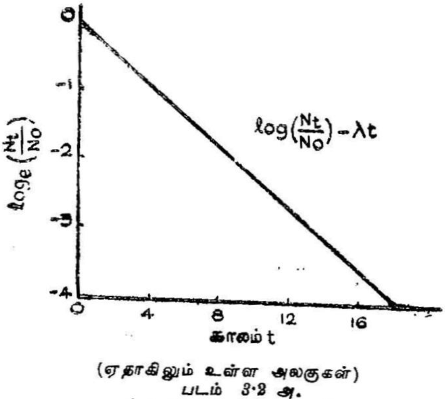
$$Nt = N_o e^{-\lambda t}$$

$$\log\left(\frac{Nt}{No}\right) = -\lambda t\,.$$

அல்லது

$$\log Nt = \log No - \lambda t \qquad \ldots \quad (3{\cdot}8)$$

கதிரியக்கப் பொருளில், ஒரு குறிப்பிட்ட காலத்திற்குப் பிறகு (t செ.) 'கணிப்பாள்களைக் கொண்டு t செகண்டுகளுக்குப் பிறகு பொருளிலுள்ள அணுக்களின் எண்ணிக்கையான Nt-யின் மதிப்பைப் பெறலாம். இதிலிருந்து $\log = \left(\frac{Nt}{No}\right)$-ஐயும், t-யையும் சேர்த்து ஒரு வரை படம் (படம் 3·2 அ) வரைந்தால், அது ஒரு



(ஏதாகிலும் உள்ள அலகுகள்)
படம் 3·2 அ.
λ-ன் மதிப்பைக் காணல்

நேர்க்கோடாக அமையும். இந்த நேர்க்கோட்டின் சரிவு 'λ'-வின் மதிப்பைக் கொடுக்கும். λ-ன் மதிப்பிலிருந்து சமன்பாடு

(3·7)-ஐக் கொண்டு கதிரியக்கப் பொருளின் அரை வாழ்வுக் காலத்தைப் பெறலாம்.

சராசரி வாழ்வுக் காலம்

ஒரு கதிரியக்கப் பொருளின் கதிரியக்கச் சிதைவெண் 'λ' என்றால் அதன் சராசரி வாழ்வுக்காலம்.

$$\overline{T} = \frac{1}{\lambda} \qquad \ldots \quad (3\cdot 9)$$

இதைக் கீழ்க்கண்டவாறு தருவிக்கலாம்.

t வினாடிகள்வரைத் தேய்வடையாத அணுக்களின் எண்ணிக்கையை N என்று கொள்வோம். இப்பொழுது பொருளில் உள்ள ஒவ்வோர் அணுவும் t வினாடிகள் வாழ்வுக் காலம் கொண்டிருக்கும். அதன் பின் ΔN அணுக்கள் Δt நேரத்தில் தேய்வுறுவதாகக் கொண்டால், ΔN அணுக்களின் மொத்த வாழ்வுக் காலம் $\Sigma \Delta N.t$ ஆகும். N-ன் மதிப்பு மிக அதிகமாக உள்ளதால்,

$\Sigma \Delta N\cdot t$ என்பதை $\int_0^\infty dN.t$ என்று எழுதலாம்.

எனவே, சராசரி வாழ்வுக் காலம்

$$\overline{T} = \frac{1}{No} \int_0^\infty t\, d\, N \text{ ஆகும்.}$$

ஆனால், சமன்பாடு ·(3)-ன்படி

$$dN = -\lambda\, Ndt$$

சமன்பாடு (·6)-ன் படி

$$N = N_o e^{\lambda t}$$

பகுதி கண்டால்,

$$dN = -\lambda\ N_o e^{-\lambda t} dt$$

என்பது கிடைக்கும். எனவே,

$$\overline{T} = \frac{1}{No} \int_0^\infty \lambda\, N_o e^{-\lambda t}\, dt$$

$$= \lambda \int_0^\infty te^{-\lambda t}\,dt$$

$$= \lambda \left[\left| \frac{te^{-\lambda t}}{-\lambda} \right|_\infty^0 - \int_0^\infty \frac{e^{-\lambda t}}{-\lambda}\,dt \right]$$

$$= \frac{+\lambda}{\lambda} \int_0^\infty e^{-\lambda t} = + \left[\frac{e^{-\lambda t}}{-\lambda} \right]_0^\infty$$

$$= \frac{1}{\lambda}.$$

$$\therefore \quad \bar{T} = \frac{1}{\lambda} \qquad \ldots \quad (3 \cdot 9)$$

மேற்கண்ட சமன்பாடு தனிப்பட்ட, கதிரியக்கமுடைய ஒரு தனிமத்தின் சராசரி வாழ்வுக் காலத்தைக் குறிக்கிறது. λ என்பது ஒரு வினாடியில் ஓர் அணு தேய்வுறுதற்குரிய 'நிகழ்திறனை'க் குறிப்பதால் $\bar{T}$, என்பது தனிப்பட்ட ஓர் அணு சிதைவுறுதற்கு வேண்டிய தோராயமான நேரத்தைக் குறிக்கிறது எனலாம்.

மாதிரிக் கணக்கு 1

20 ஆண்டுகள் அரை வாழ்வுக் காலம் கொண்ட ஒரு தனிமத்தின் கதிரியக்கத் தேய்வெண்ணைக் கணக்கிடுக.

அரை வாழ்வுக் காலம் $T_{\frac{1}{2}} = \dfrac{0 \cdot 6931}{\lambda}$

$$\therefore \quad \lambda = \frac{0 \cdot 6931}{T_{\frac{1}{2}}}$$

இங்கு $T_{\frac{1}{2}} = 20$ ஆண்டுகள்.

$$\therefore \quad \lambda = \frac{0 \cdot 6931}{20} = 0 \cdot 03465/\text{ஆண்டு}$$

மாதிரிக் கணக்கு 2

ஒரு கிராம் எடையுள்ள கதிரியக்கப் பொருளொன்று தன் எடையில் 1 சென்டிகிராம் இழப்பதற்கு 50 செகண்டுகள் எடுத்துக் கொள்கின்றதெனில், அப்பொருளின் 'அரை வாழ்வுக்காலம்' எவ்வளவு ?

கதிரியக்கத் தேய்வு விதியின் மூலம்

$$N = N_o e^{-\lambda t}$$

என்பதை அறிவோம்.

இங்கு $t=o$ ஆக இருக்கும்போது, கதிரியக்கப் பொருளின் எடை 1 கிராம்.

50 செகண்டுகளுக்குப் பிறகு ($t=50$ செ.) கதிரியக்கத்தினல் தேய்வுருமல் எஞ்சி இருக்கும் பொருளின் நிறை

$= (1—0{\cdot}01) = 0{\cdot}99$ கிராம்.

$=$ எனவே $\dfrac{N}{No} = \dfrac{99}{100}$

இம் மதிப்பை மேற்கண்ட சமன்பாட்டில் சரியீடு செய்தால்

$$\frac{99}{100} = e^{-\lambda t}$$

அல்லது $e^{\lambda t} = \dfrac{100}{99}$

$$\lambda t = \log e \frac{100}{99} = 2{\cdot}3026 \times \log_{10}\left(\frac{100}{99}\right)$$

$$\therefore \quad \lambda = \frac{2{\cdot}3026 \times \log_{10}\left(\frac{100}{99}\right)}{t}$$

$$= \frac{2{\cdot}3026 \times \log_{10}\left(\frac{100}{99}\right)}{50}$$

$= \quad 2{\cdot}3026 \times 10^{-4}$ / செகண்டு

கதிரியக்கப் பொருளின் அரை வாழ்வுக்காலம்

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{0{\cdot}6931}{\lambda}$$

$$= \frac{0{\cdot}6931}{2{\cdot}3026 \times 10^{-4}} = 3420 \text{ செகண்டுகள்.}$$

$$= 57 \text{ நிமிடங்கள்.}$$

மாதிரிக் கணக்கு 3

1 கிராம் ரேடியம் இன்னும் 100 ஆண்டுகள் கழித்து எவ்வளவு நிறையுடையதாக இருக்கும்?

ரேடியத்தின் அரை வாழ்வுக்காலம் = 1600 ஆண்டுகள்

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad ; \quad \lambda = \frac{0{\cdot}6931}{T_{\frac{1}{2}}}$$

ஒரு கிராம்-அணு நிறையையுடைய பொருள் ஒன்று அவகாட்ரோ எண்ணான N_a ($= 6{\cdot}02 \times 10^{23}$) அணுக்களைக் கொண்டிருக்கும். அதாவது A நிறையுடைய (A = அணு எடை) ரேடியம் N_a அணுக்களைக் கொண்டிருக்கும்.

$\therefore$ 1 கிராம் ரேடியம் $\frac{Na}{A}$ அணுக்களைக் கொண்டிருக்கும். 100 ஆண்டுகள் கழித்து இருக்கும் ரேடியத்தின் நிறையை X கிராம் என்று வைத்துக்கொள்வோம்.

X கிராம் ரேடியம் $\frac{N_a}{A} \times X$ அணுக்களைக் கொண்டிருக்கும்.

தொடக்கத்தில் நிறை 1 கிராம் ஆக இருக்கும்போது ($t = o$) ரேடியத்திலுள்ள அணுக்களின் எண்ணிக்கை

$$No = \frac{Na}{A}$$

100 ஆண்டுகள் கழித்து நிறை X கிராம் ஆக இருக்கும்போது ($t = 100$ ஆண்டுகள்) அதிலுள்ள அணுக்களின் எண்ணிக்கை

$$N = X \cdot \frac{Na}{A}$$

எனவே $N = N_0 e^{-\lambda t}$ என்ற சமன்பாட்டில், N, No இவற்றிற்கான மதிப்பீடுகளைச் சரியீடு செய்தால்

$$X \cdot \frac{Na}{A} = N_0 e^{-\lambda t}$$

அல்லது $X = e^{-\lambda t} = e^{\frac{-0 \cdot 6931}{1600}} \times 100$

$$\therefore \quad X = \frac{1}{e^{\frac{0 \cdot 6931}{1600}} \times 100}$$

$= \mathbf{0 \cdot 958}$ **கிராம்.**

மாதிரிக் கணக்கு 4

ரேடியம் தனிமத்தின் அணு எடை = 226. ஒரு கிராம் எடையுள்ள ரேடியம் $3 \cdot 67 \times 10^{10}$ α-துகள்களை வெளியிடுவதாகத் தெரிகிறது. ரேடியம் தனிமத்தின் அரை வாழ்வுக் காலத்தைக் கணக்கிடுக.

ரேடியம் தனிமத்தின் அணு எடை = 226.

அதாவது ரேடியத்தின் '1 கிராம்—அணு'வின் எடை = 226 கிராம்.

அவகாட்ரோ எண் $= 6 \cdot 02 \times 10^{23}$

எனவே ஒரு கிராம் நிறையுள்ள ரேடியத்தில் இருக்கும் அணுக்களின் எண்ணிக்கை

$$N = \frac{6 \cdot 02 \times 10^{23}}{226}$$

1 கிராம் ரேடியத்தின் கதிரியக்கத் தேய்வு வீதம்

$$\frac{dN}{dt} = 3 \cdot 67 \times 10^{10} / \text{விநாடி}.$$

கதிரியக்கத் தேய்வு விதியின்படி, ஒரு பொருளின் கதிரியக்கத் தேய்வு வீதம், அப்பொழுதுள்ள N அணுக்களுக்கு நேர் விகிதத்தில் அமையும்.

$$\frac{-dN}{dt} = \lambda N$$

ஆனால் $\lambda = \dfrac{0 \cdot 6931}{T_{\frac{1}{2}}}$.

இதில் $T_{\frac{1}{2}}$ என்பது பொருளின் அரை வாழ்வுக்காலம்.

$$\therefore \quad \frac{dN}{dt} = \frac{0{\cdot}6931}{T_{\frac{1}{2}}} N$$

அல்லது $$T_{\frac{1}{2}} = \frac{0{\cdot}6931N}{\frac{dN}{dt}}$$

$$= \frac{0{\cdot}6931}{3{\cdot}67 \times 10^{10}} = \frac{6{\cdot}02 \times 10^{23}}{226}$$

$$= \textbf{1595}$$ **ஆண்டுகள்.**

மாதிரிக் கணக்கு 5

கதிரியக்கமுடைய ஒரு பொருள் அதன் சராசரி வாழ்வுக் காலம்வரை தேய்வுற்றால் (அ) தொடக்கத்தில் இருந்த அணுக்களின் எண்ணிக்கைக்கும் தேய்வுறாமலிருக்கும் அணுக்களின் எண்ணிக்கைக்கும் உள்ள தகவு என்ன? (ஆ) தொடக்கத்திலிருந்த அணுக்களின் எண்ணிக்கைக்கும் தேய்வுற்ற அணுக்களின் எண்ணிக்கைக்குமுள்ள தகவு என்ன?

கதிரியக்கத் தேய்வு விதியின்படி

$$N = N_o e^{-\lambda t}$$

இதில் N_o என்பது தொடக்கத்தில் கதிரியக்கப் பொருளிலிருந்த கருக்களின் எண்ணிக்கை. N என்பது t நேரத்தில் இன்னும் தேய்வுறாமலிருக்கும் கருக்களின் எண்ணிக்கை. λ என்பது கதிரியக்கப் பொருளின் கதிரியக்கச் சிதைவெண்.

(அ) கதிரியக்கப் பொருளின் சராசரி வாழ்வுக் காலத்தை $\bar{T}$ எனவும், $\bar{T}$ நேரத்திற்குத் தேய்வுறாமலிருக்கும் அணுக்களின் எண்ணிக்கையை N' எனவும் கொண்டால்

$$N' = N_o e^{-\lambda \bar{T}} = N_o e^{-\lambda \cdot \frac{1}{\lambda}} = N_o e^{-1}$$

$$\therefore \quad \frac{N'}{No} = \frac{1}{e}$$

இது $\bar{T}$ நேரத்திற்குப் பிறகு தேய்வுறாமலிருக்கும். அணுக்களின் எண்ணிக்கைக்கும், தொடக்கத்தில் இருந்த அணுக்களின் எண்ணிக்கைக்குமிடையேயுள்ள தகவாகும்.

(ஆ) கதிரியக்கத்தினால் தேயவுற்ற அணுக்களின் எண்ணிக்கை $= No - N'$

$$\frac{N'}{No} = \frac{1}{e}$$

$$1 - \frac{N'}{No} = 1 - \frac{1}{e}$$

அதாவது $$\frac{No - N'}{No} = 1 - \frac{1}{e}$$

இது கதிரியக்கத்தினால் தேய்வுற்ற அணுக்களின் எண்ணிக்கைக்கும், தொடக்கத்திலிருந்த அணுக்களின் எண்ணிக்கைக்குமிடையேயுள்ள தகவைக் கொடுக்கிறது.

3·7. கதிரியக்கத் தொடர்களும், கதிரியக்க ஐசோடோப்புகளும்.

நாம் முன்பு அணுவின் மையத்தில் அணுக்கரு இருக்கிறதென்றும், கருவில்தான் அணுவின் பெரும்பகுதிப் பொருள் பொதிந்துகிடக்கிறதென்றும், அணுக்கருவானது கருவின் வெளியில் எத்தனை எலக்ட்ரான்கள் உள்ளனவோ அத்தனை எலக்ட்ரான்களின் எதிர்மின்னூட்டத்திற்குச் சரியான நேர்மின்னூட்டம் கொண்டிருக்கிறதென்றும் பார்த்தோம். மேலும், α-கதிர்கள் ஹீலியம் அணுக்கருக்களே என்றும், β-கதிர்கள் எலக்ட்ரான்கள் என்றும் பார்த்தோம். கதிரியக்கத்தினால் உமிழப்படும் α-கதிர்களும், β-கதிர்களும் கருவிலிருந்து வெளியேறுகின்றன என்பதும் தெரிந்ததே. எனவே, கதிரியக்கத்தின்போது ஒரு α-துகள் உமிழப்பட்டால் கருவின் நிறையில் 4 அலகுகளும், அதன் மின்னூட்டத்தில் 2 அலகுகளும் குறைகின்றன; அதாவது Z அணு எண்ணும் A அணுநிறை எண்ணும் கொண்ட அணுக்கருவிலிருந்து ஒரு α-துகள் உமிழப்பட்டால், அணுக்கருவின் அமைப்பில் கீழ்க்கண்ட மாறுதல் ஏற்படுகிறது.

$$Z \to Z-2, \quad A \to A-4$$

அணு எண்ணில் மாற்றம் ஏற்படுகிறபோது ஒரு புதிய தனிமம் தோற்றுவிக்கப்படுகிறது எனலாம். எடுத்துக்காட்டாக அணு எண் $Z = 88$, அ. நி. எ $A = 226$ கொண்ட ரேடியம் கதிரியக்கத்தால் தேய்வுறுகிறபொழுது, அ. எண் $Z = 86$, அ. நி. எண் $A = 222$ கொண்ட ரேடான் என்ற தனிமம் கிடைக்கிறது.

$A=226$		$A=222$
ரேடியம்	$\longrightarrow$	ரேடான் + α-துகள்
$Z=88$		$Z=86$

$$_{88}Ra^{226} \xrightarrow{\alpha\text{-துகள்}} {}_{88}Rw^{232}$$

மேற்கண்டபடி, கதிரியக்கத்தினல் மாற்றம் அடையும் அணுவைத் (தனிமத்தைத்) 'தாய்அணு' (தாய்த்தனிமம்) என்றும், புதிதாகத் தோன்றுகிற அணுவை (தனிமத்தை), சேய்அணு (சேய்த்தனிமம்) என்றும் அழைக்கலாம். இவ்வாறே β-கதிரியக்கத்தில் தாய்த்தனிமத்தின் அணுஎண் Z-லிருந்து $Z+1$ ஆக மாறுகிறது; ஆனல், அணுநிறைஎண் A மாறுவதில்லை. இருப்பினும் கதிரியக்கத்திற்குப் பிறகு வேறொரு தனிமந்தான் கிடைக்கிறது.

கதிரியக்கத்தின் காரணமாக முதன்முதலில் ஒரு சேய்த் தனிமம் கிடைக்கிறது. இதுவும் நிலையற்றதாக இருந்து கதிரியக்கத்தினல் மறுபடியும் தேய்வுறுமானல், மற்றொரு சேய்த்தனிமம் உற்பத்தியாகும். இவ்வாறு தொடர்ந்து நிகழும் கதிரியக்கத்தின் இறுதியில் நிலையான தனிமம் ஒன்று நமக்குக் கிடைக்கும். இத் தொடர்ச்சியான கதிரியக்கத்தினல் தோன்றும் எல்லாக் 'கதிரியக்க ஐசோடோப்புகளையும்' "கதிரியக்கக் குடும்பம்" என்று அழைக்கலாம்.

சோதனைகள் மூலம் அணு எண் $Z = 81$-லிருந்து 92 வரை உள்ள அநேக கதிரியக்கமுடைய ஐசோடோப்புகள் கண்டு பிடிக்கப்பட்டுள்ளன. பல நீண்ட சோதனைகளுக்குப் பிறகு இந்தக் கதிரியக்கமுடைய ஐசோடோப்புகள் நான்கு தொடர்களாகப் பாகுபாடு செய்யப்பட்டிருக்கின்றன. இவை இப்போது "கதிரியக்கத் தொடர்கள்" என்று அழைக்கப்படுகின்றன. இக் கதிரியத் தொடர்கள் ஒவ்வொன்றிலும் அதிக வாழ்வுக் காலம் கொண்ட ஒரு கதிரியக்க ஐசோடோப்பு, வாயு வடிவத்திலுள்ள ஓர் ஐசோடோப்புத் தொடரின் இறுதியிலுள்ள காரீயம் போன்ற நிலையான ஐசோடோப்பு ஆகிய மூன்று ஐசோடோப்புகள் உள்ளன. இத் தொடர்கள் முறையே (1) தோரியம் தொடர், (2) நெப்டியூனியம் தொடர், (3) யுரேனியம் தொடர், (4) ஆக்டினியம் தொடர் என்று அழைக்கப்படுகின்றன.

(2) யுரேனியம் தொடர் :

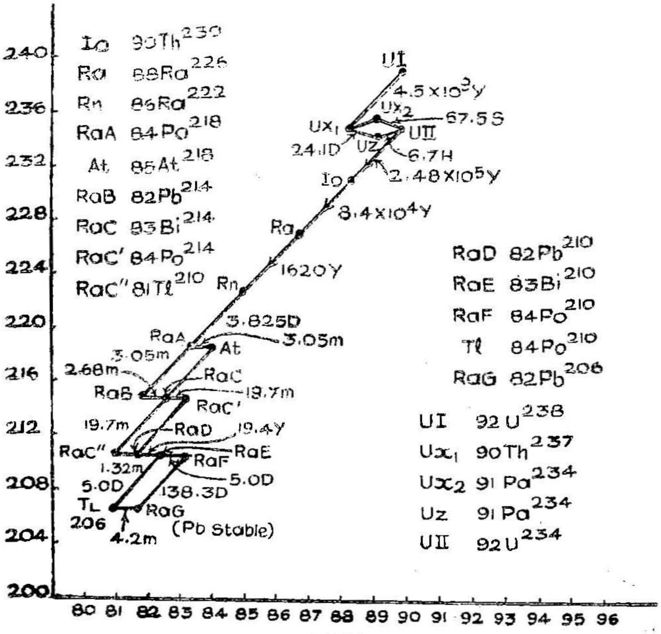
யுரேனியத் தொடரிலுள்ள கதிரியக்க ஐசோடோப்புகள் கீழே அட்டவணையில் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன. படம் 33-ல் யுரேனியத் தொடர் ஐசோடோப்புகளின் அணு எண்ணிற்கும் அவற்றின் அணுநிறை எண்ணிற்குமிடையே வரையப்படும் வரைபடம் காண்பிக்கப்பட்டிருக்கிறது. வரைபடத்திலிருந்து ரேடியம்

அட்டவணை 3·3

யுரேனியம் தொடர்

தனிமம்	குறியீடு	அரை வாழ்வுக் காலம்	கதிரியக்கத்தின் ஆற்றல் (மி. எ. வொ.) α	β	γ
யுரேனியம்	$_{92}U^{238}$ (*UI*)	$4{\cdot}50\times10^{9}$ ஆண்டுகள்	4·21	—	—
தோரியம்	$_{90}Th^{234}$(UX_1)	24·1 நாட்கள்	—	0·13	0·09
புரோட்டோ ஆக்டீனியம்	$_{91}Pa^{234}$(UX_2)	1·14 நிமிடங்கள்	—	2·32	0·80
யுரேனியம்	$_{92}U^{234}$(*UII*)	$2{\cdot}35\times10^{5}$ ஆண்டுகள்	4·76	—	—
தோரியம் (அயோனியம்)	$_{90}Th^{230}$(*Io*)	$8{\cdot}0\times10^{4}$ ஆண்டுகள்	4·66	—	γ
ரேடியம்	$_{88}Ra^{226}$	1612 ஆண்டுகள்	4·79	—	0·19
ரேடான்	$_{86}Rn^{222}$(*Em*)	3·825 நாட்கள்	5·49	—	—
பொலோனியம்	$_{84}Po^{218}$(*RaA*)	3·05 நிமிடங்கள்	5·99	β	—
ஈயம்	$_{82}Pb^{214}$(*RaB*)	26·8 நிமிடங்கள்	—	0·65	0·29
பிஸ்மத்	$_{83}Bi^{214}$(*RaC*)	19·7 நிமிடங்கள்	5·50	3·15	1·8
பொலோனியம்	$_{84}Po^{214}$(*RaC′*)	$1{\cdot}5\times10^{-4}$ வினாடிகள்	7·68	—	—
தாலியம்	$_{81}Tl^{210}$(*RaC″*)	1·32 நிமிடங்கள்	—	1·80	—
ஈயம்	$_{82}Pb^{210}$(*RaD*)	22·2 ஆண்டுகள்	—	0·026	0·047
பிஸ்மத்	$_{83}Bi^{210}$(*RaE*)	4·97 நாட்கள்	—	1·17	—
பொலோனியம்	$_{84}Po^{210}$(*RaF*)	138 நாட்கள்	5·30	—	γ
ஈயம்	$_{82}Pb^{206}$(*RaG*)	உறுதிநிலையில் உள்ளது	—	—	—

தனிமமானது இத் தொடரின் தொடக்கத்திலுள்ள தனிமம் அன்று என்பது புலனாகின்றது. மேலும், இத் தொடரின் முதல் தனிமமான யுரேனியத்தின் ($_{92}U^{238}$) அரை வாழ்வுக் காலம் ($4{\cdot}5\times10^{9}$ ஆண்டுகள், புவியின் வயதைவிட ($3{\cdot}5\times10^{9}$ ஆண்டுகள்) அதிகமாக இருப்பதும் தெரிய வருகிறது. இத் தொடரின் முடிவிலுள்ள சேய்த்தனிமம் ஈயம் $_{82}Pb^{206}$ ஆகும். இத் தொடரானது $(4n+2)$ தொடர் என்று அழைக்கப்படுகிறது. இதில் n என்பது ஒரு முழு எண்.



படம் 3·3.(a)
அணு எண் Z யுரேனியம் $(4n+2)$ தொடர்

1. தோரியம், ஆக்டீனியம், நெப்டியூனியம் தொடர்கள்.

யுரேனியத் தொடரைப் போன்றே மேலும் மூன்று தொடர்கள் உள்ளன என்பது சோதனைகள் வாயிலாக நாம் அறியும் ஓர் உண்மை. அவை முறையே "தோரியம் தொடர்" $(4n+0)$, "ஆக்டீனியம் தொடர்" $(4n+3)$, "நெப்டியூனியம் தொடர்" $(4n+1)$ என்றழைக்கப்படுகின்றன. இத் தொடர்களின் தாய்த் தனிமமும், சேய்த் தனிமமும் கீழே அட்டவணையில் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன.

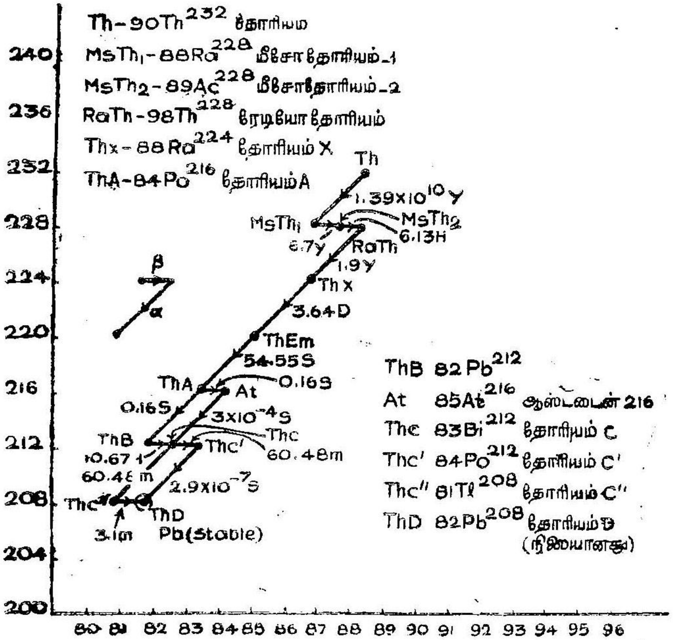
அட்டவணை 3·4

கதிரியக்கத் தொடர்கள்

எண்	தொடரின் பெயர்	குறியீடு	தாய்த் தனிமம்	சேய்த் தனிமம்
1.	தோரியம்	4n+0	$_{90}Th^{232}$	$_{82}Pb^{208}$
2.	நெப்டியூனியம்	4n+1	$_{93}Np^{237}$	$_{83}Bi^{209}$
3.	யுரேனியம்	4n+2	$_{92}U^{238}$	$_{82}Pb^{206}$
4.	ஆக்டீனியம்	4n+3	$_{92}Pa^{235}$	$_{82}Pb^{207}$

3. தோரியம் தொடர்.

இத் தொடரில் அதிக அரை வாழ்வுக் காலம் உடைய ஐசோடோப்பு $_{90}Th^{232}$ ஆகும். இது $1{\cdot}39 \times 10^{10}$ ஆண்டுகள்



படம் 3·3 (b)

தோரியம் தொடர்

அட்டவணை 3·5

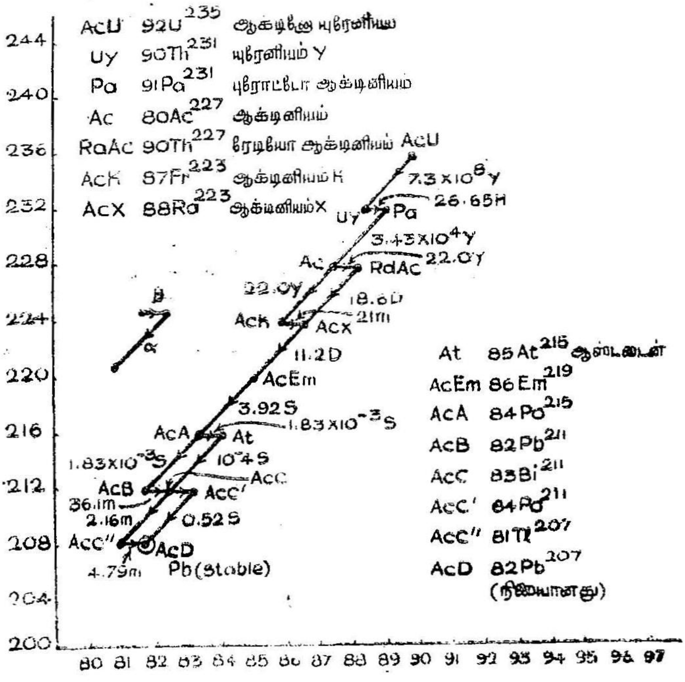
தோரியம் தொடர்

தனிமம்	குறியீடு	அரை வாழ்வுக் காலம்	கதிரியக்கத்தின் ஆற்றல் (மி. எ. வோ) α	β	γ
தோரியம்	$_{90}Th^{232}$	$1{\cdot}39 \times 10^{10}$ ஆண்டு	4·20	—	—
மீசா தோரியம்-1	$_{88}Ra^{228}$ (*Ms Th-1*)	6·7 ஆண்டு	—	0·053	—
மீசா தோரியம்-2	$_{89}Ac^{228}$ (*Ms Th-2*)	6·13 மணி	4·5	1·55	0·96
ரேடியோ தோரியம்	$_{90}Th^{228}$ (*Rd Th*)	1·90 ஆண்டு	5·42	—	0·08
தோரியம்-X	$_{88}Ra^{224}$ (*Th-x*)	3·64 நாட்	5·68	—	0·25
தோரான்	$_{86}Rn^{220}$ (*Tn*)	54·5 விநாடி	6·28	—	—
தோரியம்-A	$_{80}Po^{216}$ (*Th-A*)	0·158 விநாடி	6·77		—
தோரியம்-B	$_{82}Pb^{212}$ (*Th-B*)	10·6 மணி	—	0·36	—
தோரியம்-C	$_{83}Bi^{212}$ (*Th-C*)	60·5 நிமிடம்	6·05	2·20	—
தோரியம்-C'	$_{84}Po^{212}$ (*Th-C'*)	3×10^{-7} விநாடி	8·95	—	—
தோரியம்-C''	$_{81}Tl^{208}$ (*Th-C''*)	3·1 நிமிடம்	—	1·82	2·62
தோரியம்-D	$_{82}Pb^{208}$	உறுதி நிலையில் உள்ளது	—	—	—

அரை வாழ்வுக் காலம் உடையது. கதிரியக்கத் தேய்வு முறையில் Th - c தனிமம் Ra—c ஐசோடோப்பைப் போன்றது. Th - c கதிரியக்கத்தில் 65 விழுக்காடு β-கதிரியக்கமும், எஞ்சிய 35 விழுக்காடு α-கதிரியக்கமும் காணப்படுகின்றன. யுரேனியம் தொடரில் எவ்வாறு ரேடான் வளிமம் இருக்கிறதோ அவ்வாறே இத் தொடரில் "தோரான்" ($_{80}Rn^{220}$) வளிம வடிவில் காணப்படுகிறது. தோரியம் தொடரிலுள்ள எல்லாத் தனிமங்களும் கீழ்க்கண்ட அட்டவணையில் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன. அவற்றின் கதிரியக்கங்களைப் பற்றிய புள்ளி விவரங்களும் அந்த அட்டவணையில் இடம் பெறுகின்றன.

3. ஆக்டினியம் தொடர் (4n+3)

இது அட்டவணை 3·6-ல் கொடுக்கப்பட்டுள்ளது. இதில் அதிக வாழ்வுக் காலம் கொண்ட ஐசோடோப்பு U^{235}



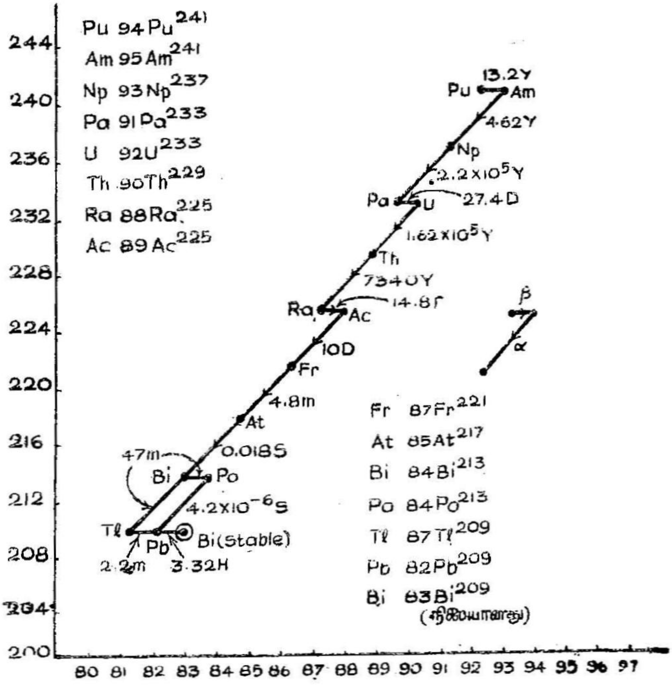
படம் 3·3 (c).
ஆக்டினியம் தொடர்

அட்டவணை 3·6

ஆக்டினியம் தொடர்

எண்	தனிமம்	குறியீடு	அரை வாழ்வுக் காலம்	கதிரியக்க ஆற்றல் மி. எ. வோ. α	β	γ
1.	ஆக்டினோ யுரேனியம்	$_{95}U^{235}$	$7{\cdot}07\times10^{8}$ ஆண்டு	4·52	—	—
2.	யுரேனியம் (Uy)	$_{90}Th^{231}$	24·6 மணி	—	~0·2	0·03
3.	புரோட்டோ ஆக்டினியம்	$_{91}Pa^{231}$	$3{\cdot}2\times10^{4}$ ஆண்டு	5·05	—	0·32
4.	ஆக்டினியம்	$_{89}Ae^{227}$	13·5 ஆண்டு	5·0	0·22	—
5.	ரேடியோ ஆக்டினியம்	$_{90}Th^{227}(Rd\text{-}Ac)$	18·9 நாள்	6·05	—	—
6.	ஆக்டினியம்—x	$_{88}Ra^{223}(Ac\text{-})X$	11·2 நாள்	5·72	—	—
7.	ஆக்டினோன்	$_{86}Rn^{219}(An)$	3·92 விநாடி	6·82	—	—
8.	ஆக்டினியம்—A	$_{84}Po^{215}(AcA)$	$1{\cdot}83\times10^{-3}$ விநாடி	7·36	—	—
9.	ஆக்டினியம்—B	$_{82}Pb^{211}(AcB)$	36·1 நிமிடம்	—	0·5	0·8
10.	ஆக்டினியம்—C	$_{83}Bi^{211}(Ac\text{-}C)$	2·16 நிமிடம்	6·62	—	—
11.	ஆக்டினியம்—C′	$_{84}Pb^{211}(AcC')$	5×10^{-3} விநாடி	7·43	—	—
12.	ஆக்டினியம்—C″	$_{81}Tl^{207}(AcC'')$	4·76 நிமிடம்	—	1·47	—
13.	ஆக்டினியம்—D	$_{82}Pb^{207}$	நிலையானது	—	—	—

(ஆக்டினோ-யுரேனியம்) ஆகும். இது $7{\cdot}07\times10^{8}$ ஆண்டுகள் அரை வாழ்வுக் காலம் உடையது. ஆக்டினன் ($_{86}Rn^{219}$) தனிமம் 4 செகண்டுகள் அரை வாழ்வுக் காலம் கொண்ட ஒரு வளிம உருவிலிருக்கும் ஐசோடோப்பாகும். *Ac·c*, 99·7 விழுக்காடு α-கதிரியக்கமுடையது.



படம் 3·3 (*d*).
நெப்டியூனியம் தொடர்

(4) நெப்டியூனியம் தொடர் :

இத் தொடரிலுள்ள தனிமங்கள் அட்டவணை 3·7-ல் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன. இத் தொடரின் ஆரம்பத்திலிருக்கும் ஐசோடோப்புகள் கீழ்க்கண்டவாறு கதிரியக்கமடைகின்றன.

$$_{93}Np^{237} \xrightarrow{\alpha} {}_{91}Pa^{233} \xrightarrow{\beta} {}_{92}U^{233}$$

அட்டவணை 3·7-ல் கொடுக்கப்பட்டுள்ள மதிப்பீடுகள், மற்ற அட்டவணைகளில் கொடுக்கப்பட்டுள்ள மதிப்புகளைப் போலத்

அட்டவணை 3·7
நெப்டியூனியம் தொடர்

எண்	குறியீடு	அரை வாழ்வுக் காலம்	கதிரியக்கத்தின் ஆற்றல் மி. எ. வோ. α	β	γ
1.	$_{94}Pu^{241}$	~10 ஆண்டுகள்	—	~0·01	—
2.	$_{95}Am^{241}$	490 ஆண்டுகள்	5·45	—	0·062
3.	$_{93}Np^{237}$	$2{\cdot}25 \times 10^{6}$ ஆண்டுகள்	4·77	—	—
4.	$_{91}Pa^{233}$	27 4 நாட்கள்	—	0·23	0·084
5.	$_{92}U^{233}$	$1{\cdot}63 \times 10^{5}$ ஆண்டுகள்	4·823	—	0·30
6.	$_{90}Th^{229}$	7×10^{3} ஆண்டுகள்	5·02	—	—
7.	$_{88}Ra^{225}$	14·8 நாட்கள்	—	~0·2	—
8.	$_{89}Ac^{225}$	10·0 நாட்கள்	5·80	—	—
9.	$_{87}Fr^{221}$	4·8 நிமிடம்	6·30	—	—
10.	$_{85}At^{217}$	0·018 விநாடி	7·02	—	—
11.	$_{83}Bi^{213}$	46 நிமிடம்	5·90	1·2	—
12.	$_{84}Po^{213}$	$3{\cdot}2 \times 10^{-6}$ விநாடி	8·336	—	—
13.	$_{81}Tl^{209}$	2·2 நிமிடம்	—	1·8	—
14.	$_{82}Pb^{209}$	3·32 மணி	—	0·68	—
15.	$_{83}Bi^{209}$	நிலையானது	—	—	—

துல்லியமானவை அல்ல. ஏனெனில் இம் மதிப்பீடுகளைக் கொடுக்கும் சோதனைகளெல்லாம் மிகச் சிறிய அளவிலே கிடைக்கும் தனிமங்களைக் கொண்டுதான் நிகழ்த்தப்பட்டன. கதிரியக்கத் தேய்வில் கிடைக்கும் முக்கியமான ஐசோடோப்புகளில் பிரான்சியம் ($_{87}Fr^{221}$), அஸ்டாடின் ($_{85}At^{217}$) என்ற இரண்டு ஐசோடோப்புகளும் 1947ஆம் ஆண்டுதான் பெயரிடப் பட்டன.

இத் தொடரிலுள்ள பிஸ்மத் ($_{83}Bi^{213}$) ஐசோடோப்பு 3 விழுக்காடு α-கதிரியக்கமும், எஞ்சிய 97 விழுக்காடு β-கதிரியக்கமும் உடையன. இத் தொடரில் அணு எண் $Z=86$ கொண்ட தனிமம் காணப்படவில்லை. எனவே, மற்றத் தொடர்களிலுள்ளது போல் இத் தொடரில் வளிம உருவில் ஓர் ஐசோடோப்பும் இல்லை எனலாம். தவிர, இத் தொடர் மற்றத் தொடர்களிலிருந்து மற்றொரு வகையிலும் வேறுபடுகின்றது. இதைத் தவிர்த்த மற்றத் தொடர்களில் இறுதியாக உறுதிநிலையிலுள்ள ஐசோடோப்பு ஈயம் ஆகும். ஆனால், இத் தொடரின் நிலையான இறுதி ஐசோடோப்பு பிஸ்மத் ($_{83}Bi^{209}$) ஆகும்.

அட்டவணை 3—8.

கரு	மலிவு %	அரை வாழ்வுக் காலம்	உமிழ்வு	ஆற்றல் மி.எ.வொ.
$_{19}K^{40}$	0·012	$1{\cdot}3\times10^{10}$ ஆண்டுகள்	β, γ, K	β 1·4 γ 1·45
$_{37}Rb^{87}$	27·2	6×10^{10} ஆண்டுகள்	β, γ	β 0·13 γ 0·08
$_{62}Sm^{148}$	11·2	6×10^{10} ஆண்டுகள்	α	2·14
$_{71}Lu^{176}$	2·6	$2{\cdot}4\times10^{10}$ ஆண்டுகள்	β, γ, K	β 0·40 γ 0·26
$_{75}Re^{187}$	62·9	4×10^{12} ஆண்டுகள்	β	0·043
$_{83}Bi^{209}$	100	2×10^{17} ஆண்டுகள்	α	3·15

அட்டவணை 3-8 தொடர்களாக இல்லாத, ஆனால் இயற்கையில் கிடைக்கும் கதிரியக்கமுடைய தனிமங்கள்.

5. தொடர்களாக இல்லாத சில கதிரியக்கத் தனிமங்கள்

அனேகமாக, புவியிலுள்ள எல்லாப் பொருள்களும் கதிரியக்கமுடைய – ஆனால் மிகச் சிறிய அளவு கொண்ட – தனிமங்களைக் கொண்டிருக்கின்றன எனலாம். இத்தகைய கதிரியக்கப்

பொருள்கள் கதிரியக்க வேதியல் முறையினால் பிரித்து எடுக்கப் பட்டிருக்கின்றன. இவற்றில் பெரும்பாலானவை கனமான தனிமங் களே. இருப்பினும் ஒரு சில இலேசான தனிமங்களும் கதிரி யக்கம் கொண்டிருக்கின்றன. அட்டவணை 3·8-ல் கதிரியக்க முடைய ஐந்து தனிமங்களும் அவற்றின் அரை வாழ்வுக் காலங்களும் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன.

அட்டவணை 3·8-ல் உள்ள தனிமங்களெல்லாம் அதிக அரை வாழ்வுக் காலங்களைக் கொண்டுள்ளதால், அவற்றைத் துல்லிய மாக அளப்பது கடினம். இத் தனிமங்களுக்கிடையே ஒரு விதமான தொடர்பும் இல்லை எனத் தெரிகிறது. எனவே, அவற்றைக் கதிரியக்கமுடைய தனித்த தனிமங்கள் என்று அழைக்கலாம்.

3·8 கதிரியக்கத்தை அளத்தல்

இயற்கைக் கதிரியக்கம் $N = N_0e^{-\lambda t}$ என்ற சமன்பாட்டை ஒட்டி நிகழ்கிறது என்று நாம் கண்டோம். எனவே, கதிரியக் கத்தை அளப்பதற்கு N, No ஆகியவற்றின் மதிப்புகள் தெரிந்தால் போதுமானது. இங்கு N என்பது t நேர அளவிற்குப் பிறகு இன்னும் தேய்வடையாத அணுக்களின் எண்ணிக்கை. இந்த இரண்டு எண்ணிக்கைகளையும் நாம் தனித்தனியே கணக்கிட முடியாதாகையால் கதிரியக்கத்தை அளப்பதற்கு ஓர் அலகை ஏற்படுத்திக்கொள்வது அவசியமாகிறது. அனேக ஆண்டு களாக நடைமுறையில் 'க்யூரி' என்ற அலகு கதிரியக்கத்தை அளப்பதற்குப் பயன்பட்டுவந்தது. இவ் வலகு ரேடியத்தைக் கண்டுபிடித்த பெருமாட்டியின் பெயரை ஒட்டிப் பெயரிடப்பட் டிருக்கிறது.

கதிரியக்கத்தினால் ஒரு பொருள், ஒரு வினாடிக்கு $3·7 \times 10^{10}$ சிதைவுகள் அடைந்தால் அப் பொருளின் கதிரியக் கத்தை ஒரு க்யூரி எனலாம். இது 1 கிராம் ரேடியத்தில் ஒரு வினாடியில் ஏற்படும் கதிரியக்கச் சிதைவுகளுக்குச் சமமாகும்.

இவ் வலகின் அதம மட்ட அலகுகள்.

1 மில்லி க்யூரி (1 *mci*) $= 3·7 \times 10^7$ சிதைவுகள்/வினாடி

1 மைக்ரோ க்யூரி ($1\mu ci$) $= 3·7 \times 10^4$ சிதைவுகள்/வினாடி.

சோதனைகள் மூலம் கண்டறியப்பட்ட ரேடியத்தின் அரை வாழ்வுக் காலத்திலிருந்து ரேடியத்தின் தேய்வு மாறிலியை

$1{\cdot}38 \times 10^{-11}$ விநாடி$^{-1}$ என்று தருவிக்கலாம். ரேடியத்தின் அணு நிறை எண் 226. அவகாட்ரோ (Avagadro) விதிப்படி ஒரு கிராம் அணு ரேடியத்தில் $6{\cdot}0 \times 10^{23}$ அணுக்கள் உள்ளன என அறியலாம். எனவே ஒரு கிராம் ரேடியத்தில்

$6{\cdot}0 \times 10^{23}/226 = 2{\cdot}6 \times 10^{21}$ அணுக்கள் உள்ளன.

$$\frac{dn}{dt} = -\lambda N = 1{\cdot}38 \times 10^{-11} \times 2{\cdot}6 \times 10^{21}$$

$$= 3{\cdot}7 \times 10^{10} \text{ சிதைவுகள்/விநாடி}$$

மேற்சொன்ன கியூரி என்ற அலகு கதிரியக்கப் பொருளில் ஏற்படும் சிதைவுகளின் எண்ணிக்கையை அடிப்படையாகக் கொண்டு ஏற்படுத்தப்பட்டதேயல்லாமல், உமிழ்வுகளின் எண்ணிக்கையை அடிப்படையாகக் கொண்டு ஏற்படுத்தப் பட்டது அல்ல. எனவே, கதிரியக்க அளவீடுகள் மிகத் துல்லிய மாக அளவிடப்படும்போது க்யூரியின் மதிப்பில் ஒரு சிறிது மாறுதல் ஏற்படக்கூடும். இதைத் தவிர்க்கத் தற்போது 'ருதர் போர்டு' என்ற மற்றோர் அலகு பயன்படுத்தப்படுகிறது.

1 ருதர் போர்டு $= 10^6$ சிதைவுகள்/விநாடி

இவற்றைத் தவிர 'ஒப்புச் செயலூக்கம்' என்ற சொல்லும் இயற்கைக் கதிரியக்கத்தில் புழக்கத்திலிருந்துவருகிறது.

ஒரு கிராம் நிறையுள்ள பொருள் ஒரு விநாடியில் அடையும் சிதைவுகளின் எண்ணிக்கையை அப் பொருளின் 'ஒப்புச் செயலூக்கம்' என்று வரையறுக்கலாம். இதிலிருந்து குறைந்த அளவு அரை வாழ்வுக் காலம் கொண்ட ஓர் உமிழி அதிக ஒப்புச் செயலூக்கத்தைக் கொண்டிருக்கும் என்று அறிந்துகொள்ளலாம்.

மாதிரிக் கணக்கு—6.

அ. நி. எண் 238 கொண்ட யுரேனியத்தின் அரை வாழ்வுக் காலம் $4{\cdot}5 \times 10^9$ ஆண்டுகள். அதன் ஒப்புச் செயலூக்கத்தைக் கணக்கிடுக.

$$\text{ஒப்புச் செயலூக்கம்} = \frac{0{\cdot}693\ N}{T_{\frac{1}{2}}}$$

இங்கு N என்பது ஒருகிராம் நிறையுள்ள கதிரியக்கப் பொருளில் உள்ள அணுக்களின் எண்ணிக்கையையும், $T_{\frac{1}{2}}$ என்பது அப் பொருளின் அரை வாழ்வுக் காலத்தையும் குறிக்கிறது.

எனவே,

ஒப்புச் செயலூக்கம்

$$= 0{\cdot}693 \times 6 \times 10^{23}/4{\cdot}5 \times 10^{9} \times 60 \times 60 \times 24 \times 364$$
$$= 0{\cdot}693 \times 6 \times 10^{23}/4{\cdot}5 \times 10^{9} \times 3{\cdot}14 \times 10^{9}$$
$$= 12{,}200 \text{ சிதைவுகள்/விநாடி.}$$

3·9 கதிரியக்க வளர்ச்சியும் தேய்வும் (தொடர்ச்சியான சிதைவு)

அணுக்கருச் சிதைவை விவரிக்கும் விதியைப்பற்றி நாம் முன்பே பார்த்தோம். இயற்கையில் கிடைக்கும் கதிரியக்க முடைய தொடர்களின் அநேக ஐசோடோப்புகள் கதிரியக்கத் தினால் தத்தம் சேய்த் தனிமங்களை உண்டாக்குகின்றன. எனவே, ஒரே நேரத்தில் ஒரு தனிமம் உற்பத்தியாகிறது; அழிகிறது. குறிப்பிட்ட ஒரு நேரத்திற்குப் பின்னர் சேய்த்தனிம ஐசோடோப் புகளின் எண்ணிக்கையைக் கண்டுபிடிப்பதற்கு ஒரு கோர்வை தேவையாகிறது. எடுத்துக்காட்டாக, 1612 ஆண்டுகள் அரை வாழ்வுக் காலமுடைய ரேடியம், ரேடானை உற்பத்தி செய்கிறது. ரேடானின் அரை வாழ்வுக் காலம் 3·8 நாட்களே. எனவே ஒரு ரேடியம் மாதிரியில் உள்ள ரேடானின் அளவு ரேடியம், ரேடான் ஆகிய இரு தனிமங்களின் சிதைவு மாறிலிகளைப் பொறுத்திருக்கிறது. ஒரு கதிரியக்கச் சிதைவை எடுத்துக் கொள்வோம். $t=o$ நேரத்தில், கீழ்க்கண்ட புள்ளி விவரங்கள் தாய், சேய்த்தனிமங்களின் எண்ணிக்கையைக் கொடுக்கின்றன எனக் கொள்வோம்.

N_1° = தாய்த்தனிம அணுக்களின் எண்ணிக்கை

N_1 = t நேரத்திற்குப் பிறகு தாய்த் தனிம அணுக்களின் எண்ணிக்கை

λ_1 = தாய்த்தனிமத்தின் சிதைவு மாறிலி

N_2 = t நேரத்தில் சேய்த்தனிம அணுக்களின் எண்ணிக்கை

λ_2 = சேய்த் தனிமத்தின் சிதைவு மாறிலி

t-சுழியாக இருக்கும்போது சேய்த் தனிம அணுக்களின் எண்ணிக்கையையும் சுழி எனக் கொள்வோம். dt என்ற ஒரு மிகச் சிறிய நேர அளவில், N_2 அணுக்களில் கதிரியக்கத்தினால் dn_2 அணுக்கள் அதிகமானால், தாய்த்தனிம அணுக்களின் சிதைவை

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \qquad \ldots (3{\cdot}10)$$

என்ற சமன்பாட்டால் குறிப்பிடலாம்.

தாய்த்தனிமம் சிதைவுறுகிறபொழுதெல்லாம் சேய்த்தனிம அணுக்களின் எண்ணிக்கை அதிகமாகிறது. ஆனால், சேய்த் தனிமமும் தொடர்ந்து சிதைவுறுவதால் சேய்த்தனிம அணுக்களின் எண்ணிக்கை குறைகிறது.

சேய்த்தனிம அணுக்களின் ஆக்கம் $= -\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1$

சேய்த்தனிம அணுக்களின் தேய்வு $= \lambda_2 N_2$ ... (3·11)

எனவே, சேய்த்தனிம அணுக்களின் எண்ணிக்கையில் நிகர

மாற்றம் $= \frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$ ... (3·12)

ஆனால் $N_1 = N_1^{\circ} e^{-\lambda_1 t}$

இதைச் சமன்பாடு (3·12)-ல் பதிலீடு செய்தால்

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1^{\circ} e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2 \qquad \ldots (3{\cdot}13)$$

இரு பக்கங்களையும் $e^{\lambda_2 t}$-யால் பெருக்கி. வலப்பக்க உறுப்பை இடப்புறம் கொண்டுவந்தால்

$$e^{\lambda_2 t} dN_2 + \lambda_2 N_2 e^{\lambda_2 t} dt = \lambda_1 N_1^{\circ} e^{-\lambda_1 t}$$

என்பது கிடைக்கும். இதற்குத் தொகை கெழு காணில்

$$N_2 e^{\lambda_2 t} = \frac{\lambda_1 N_1^{\circ}}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} + c \qquad \ldots (3{\cdot}14)$$

$t = 0$ ஆக இருக்கும்போது $N_2 = 0$. இதை (3·14)-ல் பதிலீடு செய்தால்

$$c = -\frac{\lambda_1 N_1^{\circ}}{\lambda_2 - \lambda_1} \qquad \ldots (3{\cdot}15)$$

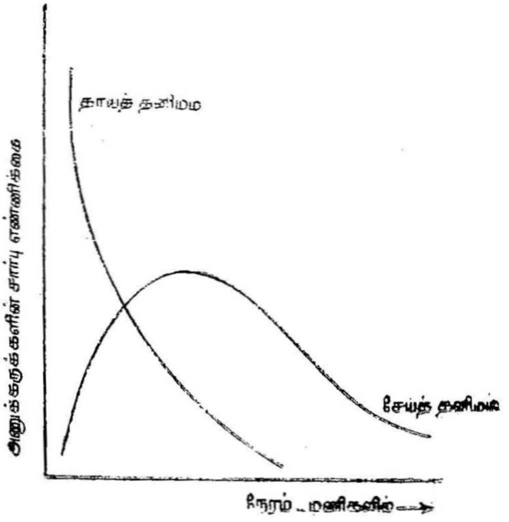
சமன்பாடு (3·14)-ல் c-ன் மதிப்பைப் பதிலீடு செய்தால்,

$$N_2 e^{\lambda_2 t} = \frac{N_1^{\circ} \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} - 1 \right]$$

அல்லது

$$N_2 = \frac{N_1^{\circ} \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right] \qquad \ldots (3{\cdot}16)$$

மேற்கண்ட சமன்பாடு t நேரத்திலுள்ள சேய்த்தனிம அணுக்களின் எண்ணிக்கையைக் கொடுக்கிறது. தாய்த் தனிமத்தின் தேய்வு, சேய்த் தனிமத்தின் வளர்ச்சி ஆகியவற்றைப் படம் 3·4 காட்டுகிறது.



படம் 3·4
தாய்த்தனிமத்தின் தேய்வு, சேய்த்தனிமத்தின் வளர்ச்சி

கதிரியக்கத்தில் ஒன்றிற்கும் மேற்பட்ட சேய்த்தனிம அணுக்கள் கிடைக்குமேயானால் ஒவ்வொன்றின் எண்ணிக்கையையும் குறிப்பதற்குத் தனித்தனியான சமன்பாடுகள் உள்ளன. எனவே, கதிரியக்கத்தில் எத்தனைச் சேய்த் தனிமங்கள் உள்ளனவோ அத்தனைச் சமன்பாடுகள் நமக்குக் கிடைக்கும். இச் சமன்பாடுகள் பேட்ஸ்மென் சமன்பாடுகள் என்று அழைக்கப்படுகின்றன.

3·10 கதிரியக்கச் சமநிலை

கதிரியக்கமுடைய அணுக்கருக்களின் தேய்வு மாறிலிகள் மிகச் சிறிய அளவிலிருந்து மிகப்பெரிய அளவுவரை உள்ளன. எனவே தாய்அணு, சேய்அணு ஆகியவற்றின் தொடர்பு சிறிது நேரத்திற்குத்தான் இருக்க முடியும். இச் சிறிய நேரத்தில் தாய்அணுக்களின் எண்ணிக்கை e-ன் மடியில் வேறுபடாது நேர்விகிதத்தில்

தேய்வு அடைகின்றன. இதன்படிச் சேய்அணுக்களின் எண்ணிகை ஒரே அளவில் மாறுகிறது என அறிலாம். ஆனல், சேய்அணு குறுகிய அரை வாழ்வுக்காலம் கொண்டு நிலையான அணுவாக இல்லாமற்போனல், அது அதிக அளவில் சிதைவுறத் தொடங்குகிறது. கதிரியக்கப் பொருளிலுள்ள சேய்அணுக்களின் எண்ணிக்கை அதிகரிக்கும்போது கதிரியக்கத்தினல் தேய்வுறும் சேய் அணுக்களின் எண்ணிக்கையும் அதிகரிக்கின்றது. ஒரு குறிப்பிட்ட நேரத்தில் உருப்பெறும் சேய் அணுக்களின் எண்ணிக்கையும் கதிரியக்கத்தினல் தேய்வும் சேய்அணுக்களின் எண்ணிக்கையும் சமமாக இருக்கும். இந் நேரத்திற்குப் பிறகு, கதிரியக்கப் பொருளில் உள்ள சேய்அணுக்களின் எண்ணிக்கை மாருமவிருக்கும். இதனை, நீண்ட (நிரந்தர) காலச் சமநிலை (Secular Equilibrium) எனலாம்.

சேய்அணுவோடு ஒப்பிடப்படும்போது தாய் அணு நிலையான தொன்ருக இருக்குமானல், அதாவது $\lambda_2 >> \lambda_1$ சமன்பாடு (3.16) கீழ்க்கண்டபடி சுருங்கும்.

$$N_2 = \frac{N^{1^\circ}\lambda_1}{\lambda_2-\lambda_1}[e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}]$$

என்பதை

$$N_2 = \frac{N_1^\circ \lambda_1}{\lambda_2}(1-e^{-\lambda_2 t}) \qquad \dots (3{\cdot}17)$$

என்று எழுதலாம்.

இது நீண்ட காலத்திற்குப் பின்னர்

$$N_2 = N_1^\circ \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \qquad \dots (3{\cdot}18)$$

என ஆகும். அல்லது

$$\frac{N_1^\circ}{N_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{\text{தாய்க் கருவின் } T_{\frac{1}{2}}}{\text{சேய்க் கருவின் } T_{\frac{1}{2}}} \qquad \dots (3{\cdot}19)$$

சமன்பாடு (3.19)-ன் படி, நீண்டகாலச் சமநிலை ஏற்பட்டால் சேய்த்தனிம அணுக்களின் எண்ணிக்கை, தாய்த்தனிம அணுக்களின் எண்ணிக்கை ஆகியவற்றிற்கிடையேயுள்ள தகவு, முறையே அவைகளின் அரை வாழ்வுக் காலங்களின் தகவிற்குச் சமமாக இருக்கும்.

இப்பொழுது ஒரு தாய்க்கரு, சேய்க்கரு ஆகியவற்றை மட்டும் கருதாமல், ஒரு முழுக் கதிரியக்கத் தொடரையே எடுத்துக் கொள்வோம். இதில் தாய்க்கரு அதிக அரை வாழ்வுக் காலத்தைக் கொண்டிருக்கும். மற்றச் சேய்க்கருக்களெல்லாம் மிகக் குறைந்த அளவுள்ள அரை வாழ்வுக் காலங்களைக் கொண்டிருப்பதால், கதிரியக்கச் சமநிலை ஏற்பட்ட பிறகு

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \ldots = \lambda N \qquad \ldots \quad (3.20)$$

என்றாகும். இச் சமன்பாட்டில் நேர அளவிற்கான மாறியே (Time-Variable) கிடையாது என்பது குறிப்பிடத்தக்கது.

கதிரியக்கத்தினல் தாய்க்கரு தேய்கிற வீதம், சேய்க்கரு தேய்கின்ற வீதத்திற்கு ஏறத்தாழ சமமாக இருக்குமாஞல் ($\lambda_1 \approx \lambda_2$) அதாவது தாய்க்கரு, சேய்க்கரு இவற்றின் வாழ்வுக் காலங்கள் ஏறத்தாழச் சமமாக இருக்குமாஞல், சேய்க்கரு முதலில் பெரும அளவிற்கு வளர்ந்து, பின்னர்த் தாய்க்கரு, சேய்க்கரு இவற்றில் எது அதிக அரை வாழ்வுக்காலம் கொண்டிருக்கின்றதோ அதன் சிதைவு வீதத்தில் சிதைவுறும். சேய்க்கரு வளரும் பெரும அளவு சமன்பாடு 3.16-ன் பகுதியைக் (Differential Coefficient) கண்டுபிடித்து அதைச் சுழியாக்கிஞல் கிடைக்கும்.

$$N_2 = \frac{N_1^\circ \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}\left[e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right]$$

$$\frac{dn_2}{dt} = \frac{N_1^\circ \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}\left[-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}\right]$$

சேய்க்கரு பெரும அளவிற்கு வளரும் காலத்தை t_m எனக் கொண்டால்,

$$\frac{N_1^\circ \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}\left[-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t_m} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t_m}\right] = 0$$

அல்லது $\lambda_1 e^{-\lambda_1 t_m} = \lambda_2 e^{-\lambda_2 t_m}$

அல்லது $e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t_m} = \lambda_2/\lambda_1$

அல்லது $(\lambda_2 - \lambda_1)t_m = \log \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$

எனவே,

$$t_m = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda} \log \frac{\lambda^2}{\lambda_2} \qquad \ldots \quad (3\ 21)$$

சேய்க் கருவின் தேய்வு வீதம் t_m நேரத்திற்குப் பின் λ^1, λ_2 என்ற தேய்வு மாறிலிகளின் மதிப்புகளைப் பொறுத்து இருக்கும். தாய்க் கரு, சேய்க்கருவைவிட அதிக வாழ்வுக் காலம் கொண்டிருக்குமேயானால், அதாவது $\lambda_1 < \lambda_2$ ஆக இருந்தால் சமன்பாடு (3·16)-ல் உள்ள இரண்டாவது உறுப்பு முதல் உறுப்பினைவிட விரைவில் சுழி மதிப்பை அடைந்துவிடும். எனவே N_2 அணுக் கருக்கள், தாய்க்கருவின் தேய்வு வீதத்தை ஒட்டித் தேய்வுறும். சமன்பாடு 3·16 கீழ்க்கண்டவாறு சுருங்கும்.

$$N_2 = \frac{N_2^\circ \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t}$$

$$= N_1 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}\right)$$

(ஏனெனில், $N_1 = N_1^\circ e^{-\lambda_1 t}$)

அல்லது

$$N_2/N_1 = \lambda_1/\lambda_2 - \lambda_1 \qquad \dots \quad (3{\cdot}22)$$

இப்பொழுது தாய்க்கரு, சேய்க்கரு இரண்டுமே தாய்க்கருவின் தேய்வு வீதத்தில் தேய்வுறும். சேய்க் கருக்களுக்கும், தாய்க் கருக்களுக்குமுள்ள தகவு N_2/N_1 என்ற ஒரு மாறிலியாக இருக்கலாம். இத்தகைய சமநிலையை 'நிலையற்ற சமநிலை' (Transient Equilibrium) என்று அழைக்கலாம்.

சேய்க்கருவின் சராசரி வாழ்வுக் காலம் தாய்க்கருவின் சராசரி வாழ்வுக் காலத்தைவிட அதிகமாக இருப்பின் ($\lambda_1 > \lambda_2$) தாய்க்கருக்கள், சேய்க்கருவின் தேய்வு வீதத்திற்கு ஏற்பத் தேய்வுறும். இப்பொழுது சமன்பாடு (3·22) கீழ்க்கண்டவாறு மாறும்.

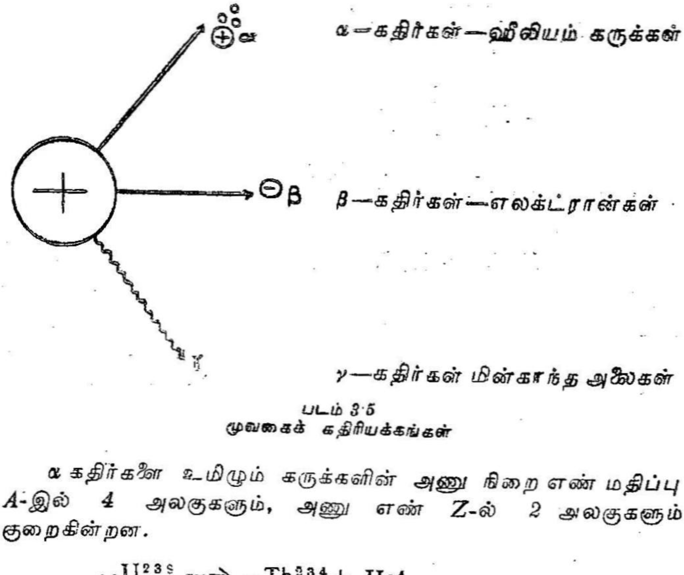
$$N_2 = N_1^\circ \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} \qquad \dots \quad (3{\cdot}23)$$

இச் சமன்பாட்டின்படி, சிறிது நேரத்திற்குப் பிறகு தாய்க் கரு ஏறத்தாழ மறைந்துவிடுகிறது எனலாம். எஞ்சியுள்ள சேய்க்கருவும் அதன் தேய்வு வீதத்திற்கேற்ப தேய்கிறது எனலாம்.

3·11 α—கதிரியக்கம்

α கதிரியக்கத் தேய்வின் சிறப்பு இயல்புகள்

இயற்கைக் கதிரியக்கத்தில் கதிரியக்கப் பொருள்களிலிருந்து மூன்று வகைக் கதிர்கள் வெளிவருகின்றன என்றும், அவை முறையே, α, β, γ கதிர்கள் என்று அழைக்கப்பட்டன என்றும் பார்த்தோம். அவற்றுள் α கதிர்கள் படம் 3·5-ல் காட்டியவாறு எலக்ட்ரான் மின்னூட்டத்தைப்போல இரண்டு மடங்கு மின்னூட்டங்கொண்டவை என்றும், β கதிர்கள் அதிகத் திசைவேகம் கொண்ட எலக்ட்ரான் என்றும், γ கதிர்கள் மின்னூட்டமற்ற மின் காந்த அலைகள் என்றும் கண்டோம்.



படம் 3·5
மூவகைக் கதிரியக்கங்கள்

α கதிர்களை உமிழும் கருக்களின் அணு நிறை எண் மதிப்பு A-இல் 4 அலகுகளும், அணு எண் Z-ல் 2 அலகுகளும் குறைகின்றன.

$$_{92}U^{238} \longrightarrow {}_{90}Th^{234} + {}_{2}He^{4}.$$

அல்லது

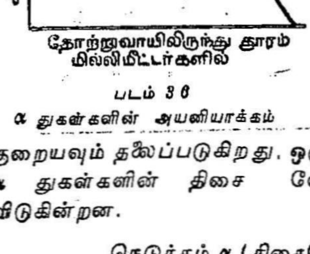
$$_{92}U^{238} \xrightarrow{\alpha} {}_{90}Th^{234}.$$

தனிம அட்டவணையில், காரீயத்திற்கு (Lead) அப்பாற்பட்ட எல்லாத் தனிமங்களும் $_{60}Nd^{144}$, $_{62}Sn^{146}$ போன்ற ஒரு சில இலேசான தனிமங்களும் α துகள்களை உமிழ்கின்றன. இத்துகள்கள் ஏறத்தாழ 3 மி.எ.வோ. விருந்து 9 மி. எ. வோல்ட்டு வரை இயக்கவாற்றல் பெற்றிருக்கின்றன. இவை எலக்ட்ரான்களைக் காட்டிலும் பன்மடங்கு நிறை வாய்ந்தவை; அவற்றைப் போல் இரண்டு மடங்கு மின்னூட்டம் கொண்டவை. பொரான் ஒளி

னூடே இவை அதிக தூரம் ஊடுருவிச் செல்வதில்லை. கதிரியக்கத்தினால் உமிழப்படும் α கதிர்களை ஒரு மெல்லிய காகிதத்தைக் கொண்டு நிறுத்திவிடலாம். α கதிர்களின் மற்றொரு முக்கியப் பண்பு அவை தனித்தனியான (Discrete) ஆற்றல்களைப் பெற்றிருப்பதே.

(அ) α—துகளும், கெய்கர் நட்டால் விதியும்

பொருள்களினூடே அதிகத் திசை வேகம் கொண்ட α கதிர்கள் செல்லும்போது அயனியாக்கம் உண்டாகிறது. இது α கதிர்களின் ஒரு முக்கிய பண்பாடு எனலாம். இத் துகள்கள் வெகு தூரம் ஊடுருவிச் செல்வதில்லை என்றாலும், இவை செல்கின்ற பாதையில் செறிந்த அயனியாக்கத்தை உண்டாக்குகின்றன. துகள்களின் இயக்க ஆற்றலையும், அவை ஊடுருவும் பொருள்களின் திண்மையையும் பொறுத்து இவற்றிற்கு ஒரு 'நெடுக்கத்தை' (Range) வரையறுக்கலாம். பொலோனியம் $_{84}Po^{210}$ தனிமத்திலிருந்து கதிரியக்கத்தினால் உமிழப்படும் α துகள்கள் காற்றில் ஏறத்தாழ 38 மி. மீ. நெடுக்கம் கொண்டிருக்கின்றன. இந்த நெடுக்கத்திற்குள் அயனியாக்கம் குறிப்பிட்ட ஓரளவிற்கு அதிகரித்துக்கொண்டே வந்து திடீரென்று சுழியாகக் குறைந்துவிடுகின்றது. இதை முதன் முதலாக W. H. பிராக் என்ற விஞ்ஞானி கண்டறிந்தார். இது படம் (3·6)-ல் காட்டப் பட்டிருக்கிறது.



படம் 3·6
α துகள்களின் அயனியாக்கம்

இதைப் பின்வருமாறு விளக்கலாம். அயனியாக்கத்தில் தோன்றிய அயனிகள் பொருளின் மூலக் கூறுகளிலுள்ள எலக்ட்ரான்களோடு மோதுவதால் அவற்றின் நெடுக்கமும், ஊடுருவும் நெடுக்கமும் குறைகின்றன. எனவே, அயனியாக்கம் தொடங்கும்பொழுது நெடுக்கம் அதிகமாகவும் தொடங்கிய பின், மேற்கூறிய காரணத்தால் குறையவும் தலைப்படுகிறது. ஒரு குறிப்பிட்ட தூரம் சென்ற பின் α துகள்களின் திசை வேகங்கள் சுழியாகக் குறைந்து விடுகின்றன.

நெடுக்கம் α (திசைவேகம்)^3

அல்லது

அட்டவணை 3-9

α-துகள் உமிழிகளும் அவற்றின் அரை வாழ்வுக் காலங்களும்

தனிமம்	குறியீடு	நெடுக்கம 760மி மீ. அழுத்தம் 15°c வெப்பநிலை	ஆற்றல் மி. எ. வோ.	அரை வாழ்வுக் காலம்	கருச்சிதைவெண்
		மி. மீ.			
Th	$_{90}Th^{232}$	29·0	3·98	$1·39 \times 10^{10}$	$1·58 \times 10^{-8}$
Ra-th	$_{90}Th^{228}$	40·2	5·42	1·9	$1·16 \times 10^{-8}$
Th-x	$_{88}Ra^{224}$	43·5	5·68	3·64	$2·20 \times 10^{-6}$
Thoran	$_{86}Ra^{220}$	50·6	6·28	54·5 வினாடி	$1·27 \times 10^{-2}$
Th-A	$_{84}Po^{216}$	56·8	6·77	0·16 வினாடி	4·33
Th-C	$_{83}Bi^{212}$	47·9	6·05	60·5 நிமிடம்	$1·92 \times 10^{-4}$
Th-C′	$_{83}Po^{212}$	86·2	8·77	3×10^{-7} வினாடி	$2·31 \times 10^{6}$

R (நெடுக்கம்) = $a\cdot$ (திசைவேகம்)^3

$$R = av^3 \qquad \ldots \quad (3\cdot24)$$

இங்கு a ஒரு மாறிலி. V = துகள்களின் திசை வேகம்

α-துகள்கள் மிகவும் எளிதாக உட்கவரப்படக் கூடியவை. செய்தித்தாள் அளவு பருமனுள்ள ஒரு காகிதம் ஏறத்தாழ எல்லா α-துகள்களையும் தடுத்துவிடக் கூடும். அஞ்சலட்டை அளவு தடிமன் உள்ள காகிதம் எல்லா α-துகள்களையும் தடுத்து விடும். எனவே, கதிரியக்கச் சோதனைச் சாலைகளில் ஆபத்துகள் இல்லாமல் இருக்க, சிறிது தடிமனுள்ள அங்கிகளை அணிந்து கொண்டால் போதுமானது. α-துகள்கள் உடலில் ஏற்படுத்தும் மாறுதல்கள் அபாயம் மிகுந்தவை. α-கதிர்களை உமிழும் தனிமங்களின் அரை வாழ்வுக் காலங்களையும் குறிப்பிட்ட ஒரு பொருளில் அவற்றின் நெடுக்கங்களையும் ஒரு சிறிது கவனிப்போம். இவை அட்டவணை 3·9-ல் காட்டப்பட்டிருந்தன.

மேலே காட்டப்பட்டுள்ள அட்டவணைப்படி, அரை வாழ்வுக் காலங்கள் $1\cdot39 \times 10^{10}$ ஆண்டுகளிலிருந்து 3×10^{-7} விநாடிகள் வரைப் பரவி இருக்கின்றன. α-கதிர்கள் உமிழும் தனிமங்களின் அரை வாழ்வுக் காலங்களுக்கும் அவற்றின் நெடுக்கத்திற்கும் இடையே தொடர்பு இருப்பதைக் காணலாம். இத் தொடர்பை முதன் முதலாகக் கெய்கர்-நட்டால் என்பவர்கள் ஒரு கோவை மூலம் கொடுத்தனர். அக் கோவை கீழே கொடுக்கப்பட்டுள்ளது.

$$T_{\frac{1}{2}}R^m = \text{மாறலி} \qquad \ldots \quad (3\cdot25)$$

இதில் $T_{\frac{1}{2}}$ என்பது α-கதிர் உமிழியின் அரை வாழ்வுக் காலத்தை குறிக்கின்றது. R என்பது α-கதிர்களின் நெடுக்கத்தையும் m ஒரு மாறலியையும் குறிக்கின்றது.

சமன்பாடு (3·25)-ஐ மாற்றி எழுதினால்

$$\lambda = AR^m \qquad \ldots \quad (3\cdot26)$$

என்று ஆகும்.

இங்கு $\lambda = 0.63/T_{\frac{1}{2}}$. A-யும் மற்றொரு மாறிலியே.

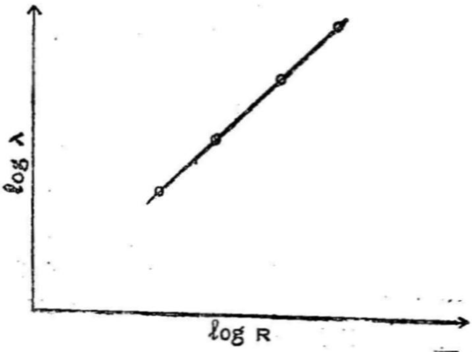
இலாகரிதம் கண்டால்

$$\log\lambda = m \log R + B \qquad \ldots \quad (3\cdot27)$$

என்ற சமன்பாடு கிடைக்கும். இதில் $B = \log A$ = மாறிலி. சமன்பாடு (3·27) கெய்கர்-நட்டால் விதி என்று பெயரிடப்

பட்டிருக்கின்றது. இது கருச்சிதைவு மாறிலிக்கும் α-கதிர்களின் நெடுக்கத்திற்கும் இடையேயுள்ள தொடர்பை விவரிக்கின்றது. இதன் உண்மை பல சோதனைகட்குப் பின்னர் உறுதிப்படுத்தப் பட்டிருக்கிறது.

பொருள்களில் α-துகள்களின் நெருக்கம் அவற்றின் இயக்க ஆற்றலுக்கு ($E = \frac{1}{2} mv^2$) நேர்விகிதத்தில் இருப்பதால் α-கதிர் உமிழியின் ஆற்றல்களுக்கும் அவற்றின் அரை வாழ்வுக் காலங் களுக்கு இடையேயும் இத்தகைய தொடர்பு இருக்கவேண்டு மெனப் புலனாகிறது. log λ, log R இவற்றின் தொடர்பைக் காட்டும் வரைபடம் ஒரு நேர்கோடாக அமைந்துள்ளது. இது படம் (3·7)-ல் காட்டப்பட்டுள்ளது.

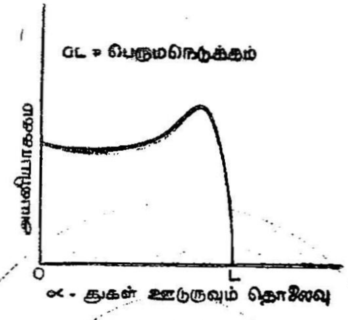


படம் 3·7.
கருச்சிதைவு மாறிலிக்கும் α-கதிர்களின் நெடுக்கத்திற்கும் இடையேயுள்ள தொடர்பு

(ஆ) α-கதிர்களின் உட்கவர்ச்சியும், அயனியாக்கக் கழிவிடு களும்

α-கதிர்கள் காற்று போன்ற ஊடகங்களினுள் செல்லும் போது அவை ஊடக அணுக்களோடு மோதுகின்றன. இதனால் அவை தம் ஆற்றலை இழக்கின்றன. எனவே α-துகள்கள் ஊடகங்களின் வழியே செல்லும்பொழுது அவற்றின் ஆற்றல் சீராகக் குறைந்துகொண்டே வந்து ஒரு குறிப்பிட்ட தொலைவிற் குப் பின் சுழியாகின்றது. இவ்வாறு ஊடகத்தில் α-துகளின் இயக்கவாற்றல் சுழியாகும்வரை அவை செல்லும் தொலைவை நாம் நெடுக்கம் (Range) என்கிறோம்.

இதைத் தவிர ஊடகங்களில் α-துகள்கள் செல்லும்போது, ஊடகங்களிலுள்ள அணுக்கள், மூலக்கூறுகள் இவற்றை அயனிகளாக α-துகள்கள் மாற்றுகின்றன. முதலில் α-துகள் காற்றில் புகும்போது, அதன் பாதையில் ஏறத்தாழ 20 முதல் 30 ஆயிரம் அயனிகள்/செ.மீ. வரை உண்டாகின்றது. இவ்வயனியாக்கத்தின் நிகழ்திறன், α-துகள்களின் திசை வேகங்கள் ஊடகத்தினுள் குறையக் குறைய அதிகமாகிறது. ஏறத்தாழ 70,000 அயனி இரட்டைகள்/செ. மீ. உண்டாகும்வரையில் இவ் வயனியாக்கம் தொடர்ந்து நிகழ்கிறது. ஊடகத்தில் α-துகள் ஊடுருவும் தொலைவு, அயனியாக்கம் இவற்றிற்கிடையேயுள்ள தொடர்பைப் படம் 3·8 காட்டுகின்றது.



படம் 3·8
ஊடகத்தில் α-துகள் ஊடுருவும் தொலைவு, அயனியாக்கம் இவற்றிற்கிடையேயுள்ள தொடர்பின் வரைபடம்

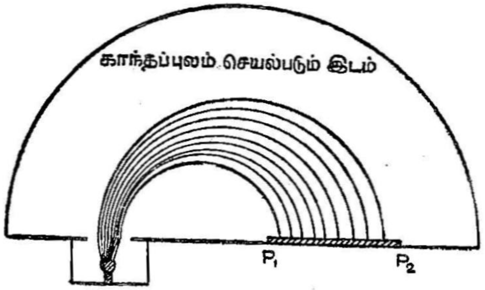
(இ) α-கதிர் ஆற்றல் நிரலும் மீநுண் வரியமைப்பும் (α-Energy Spectrum and Fine Structure)

இயற்கைக் கதிரியக்கத்தில், ஒரு பொருளிலிருந்து உமிழப்படும் α-துகள்களை 'மேகக்கலம்' (cloud chamber) கொண்டு பார்க்கும்போது, அனேகமாக எல்லாத் துகள்களும் ஒரே அளவு ஆற்றல் பெற்றிருப்பதாகத் தோன்றுகிறது. ஆனால், இன்னும் அதிக நுட்பம் வாய்ந்த ஆய்கருவிகளைக் கொண்டு அவற்றை உற்று நோக்குங்கால், சிற்சில துகள்களைத் தவிர மற்றவை வெவ்வேறு ஆற்றல்களைக் கொண்டிருப்பது தெரியவருகின்றது. 1929ஆம் ஆண்டில் ரோசன்ப்ளம் (Rosenblaum) என்பவர் காந்தப் புலத்தைக் கொண்டு α-துகள்களை வளைவுறச் செய்து அவற்றின் ஆற்றல்களை அளந்தார். இவ் வளவீடுகள் ஏறத்தாழ ஒரே ஆற்றல்களை உடைய இரண்டு அல்லது இரண்டிற்கு

மேற்பட்ட குழுக்களில் கிடைக்கின்றன என்று கண்டார். காட்டாக, தோரியம்-c கருவிலிருந்து உமிழப்படும் α-துகள்கள் அவற்றின் ஆற்றலைப் பொறுத்து 5 குழுக்களாக உமிழப்படுகின்றன. இக் குழுக்களிடையே உள்ள பெரும ஆற்றல் வேறுபாடு 0·5 மி. எ. வோல்ட்டுக்கும் குறைவாகவே உள்ளது. இவ்வாறு தெளிவான ஆற்றல் வேறுபாடு உடைய α-துகள் குழுக்களை நாம் α-கதிர் ஆற்றல் பங்கீட்டின் 'மீநுண் வரியமைப்பு' (Fine structure) என்கிறோம்.

(ங) α-கதிர் நிரல்மானி

α-கதிர்களின் ஆற்றல்களை அளப்பதற்கு அவற்றை காந்தப் புலம் கொண்டு வளைத்தல் வேண்டும். வெவ்வேறு ஆற்றல்களையுடைய கதிர்கள் வெவ்வேறு அளவிற்கு வளைய நேரிடும். இந்த வளைவுகளை அளப்பதன் மூலம் கதிர்களின் ஆற்றல்களைப் பெறலாம். இதை அடிப்படையாகக் கொண்டுதான் α-கதிர் நிரல்மானி அமைக்கப்பட்டுள்ளது. அமைப்பில் இந்த ஆய்கருவி ஒரு 'நிறை நிரல்மானியை' ஒத்திருக்கிறது எனலாம். நிறை



படம் 3·9
α-கதிர் காந்த நிரல்மானி

நிரல்மானியில் வெவ்வேறு நிறையை உடைய அணுக்களெல்லாம் காந்தப் புலத்தினால் எவ்வாறு வெவ்வேறு இடங்களில் குவிக்கப்படுகின்றனவோ, அவ்வாறே α-துகள்களும் ஒரே நிறையுடையனவாக இருந்த போதிலும், அவை வெவ்வேறு திசைவேகங்களைக் கொண்டிருப்பதால் காந்தப்புலம் கொண்டு வளைக்கப்படும்போது படம் 3·9-ல் காட்டியவாறு வெவ்வேறு இடங்களில் குவிக்கப்படுகின்றன. இந் நிரல்மானியில் ஏறத்தாழ 100,000 கௌஸ் செறிவுள்ள காந்தப் புலங்கள் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. ஆனால் α-துகளின் மூலம் மிகவும் வலிவுடையதாக இருப்பின், இதைவிடக்

குறைந்த செறிவுடைய காந்தப்புலங்களும் பயன்படுத்தப்படலாம். ஆனால், இத்தகைய அமைப்புகளால் அளக்கப்படும் அளவீடுகள் மிகத் துல்லியமாக இரா.

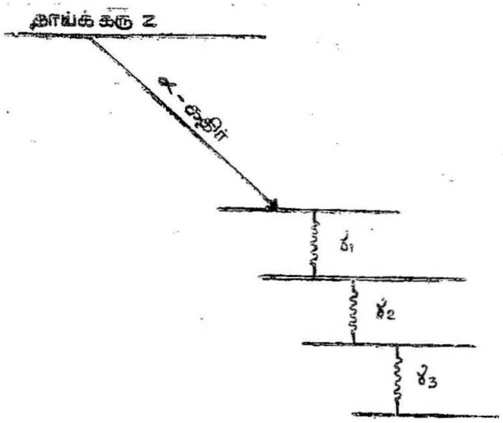
3·12 அணுக்கரு ஆற்றல் மட்டங்கள் — தேய்வு வழிகள் γ-கதிர்களின் தோற்றுவாய்.

α-கதிர் மாலையில் கிடைக்கும் மீநுண் வரியமைப்பு அணுக் கருவின் வரியமைப்பைக் கண்டறிவதற்கு, ஒரு சிறந்த ஆய்கருவி யாக உள்ளது என்று கூறுதல் மிகையாகாது. அணுக்கருவிற்கு வெவ்வேறு ஆற்றல் மட்டங்கள் இருக்கக் கூடும் என்று யூகிப் பதற்கு மேற்கூறிய மீநுண் வரியமைப்பு வழி காட்டியாக உள்ளது எனலாம். அணுக்கரு ஒன்று அதன் ஆற்றலைப் பொறுத்து அடிநிலையிலோ (ground state) அல்லது செயலூக்கம் கொண்ட நிலையிலோ (Excited state) இருக்கலாம் என்பது இதன் மூலம் தெரிகிறது. செயலூக்கம் கொண்ட ஆற்றல் மட்டங்கள் எல்லாம் தாய்த்தனிமத்தின் ஆற்றல் மட்டங்களாக இருக்க முடியாது. அவையெல்லாம் சேய்க்கருக்களின் ஆற்றல் மட்டங்களாகவே இருக்க வேண்டும் இத்தகைய செயலூக்கம் கொண்ட ஆற்றல் மட்டங்கள் கருக்களுக்கு இருப்பதால்தான் γ-கதிர்களின் தோற்றுவாய் பற்றி நாம் அறிய முடிகிறது. ஏறத்தாழ 1925ஆம் ஆண்டுவரை இயற்கைக் கதிரியக்கத்தில் உமிழப்படும் γ-கதிர்கள் கருவிலிருந்து எவ்வாறு தோன்று கின்றன என்பதைத் தெரிந்துகொள்ள முடியவில்லை. இதன் காரணம், கதிரியக்கத்தின்போது, α-கதிர்களும் β-கதிர்களும் உமிழப்பட்டபின், மிகக் குறுகிய காலத்தில் γ-கதிர்கள் வெளியிடப்படுவதே.

கதிரியக்க ஐசோடோப்பு ஒன்றிலிருந்து வெளிவரும் γ-கதிர் களின் அலை நீளங்கள் எல்லாம் அந்த ஐசோடோப்பை ஒட்டியே அமைகின்றன. ஓர் அணுக்கரு அதன் செயலூக்கம் பெற்ற ஆற்றல் மட்டத்திலிருந்து அதன் அடிமட்ட ஆற்றல் நிலைக்கு வருகின்றபொழுதுதான் γ-கதிர்கள் வெளியிடப்படுகின்றன. இயற்கையிலேயே கதிரியக்கமுடைய தனிமங்களினின்று வெளி வரும் γ-கதிர்கள் எப்பொழுதும் α, β ஆகிய கதிர்களுடனே உமிழப்படும் என்பது இதனின்று நன்கு விளங்குகிறது.

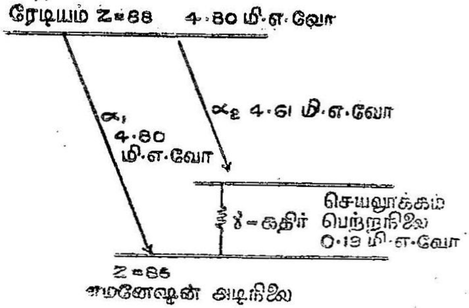
கரு தன் அடி நிலைக்கு ஒரே மாற்றத்தில் (Single Transition) வருகிறபொழுது ஒரே ஆற்றல் படைத்த γ-கதிர்களும், பல மாற்றங்களுக்குப்பின் வருகிறபொழுது பல ஆற்றல்கள் படைத்த

γ-கதிர்களும் வெளிவருகின்றன. இதனைத் 'தொடர் γ-கதிர் வீச்சு' (Cascade γ-Radioactivity) எனலாம். இத்தகைய தொடர்க் கதிர் வீச்சுகள் கீழ்க்கண்ட படத்தில் காட்டப்பட்டுள்ளன.



படம் 3·10
α-கதிர்வீச்சை அடுத்து ஏற்படும் தொடர் γ-கதிர்வீச்சு

படம் (3·11)-ல், ரேடியத்திலிருந்து 'எமனேஷன்' (Emanation) வரை ஏற்படும் கதிரியக்கத் தேய்வு காட்டப்பட்டுள்ளது. இதில் இரு வேறுபட்ட ஆற்றலுடைய γ கதிர்கள் வெளிவருகின்றன. அவை முறையே 4·80 மி. எ. வொ. ஆற்றலைப் பெற்றுள்ளவை. அவற்றைத் தவிர 0·19 மி. எ. வோ. ஆற்றலுடைய γ கதிர்களும் உமிழப்படுகின்றன என்பதைச் சோதனை வாயிலாக அறியலாம். படத்தில் காட்டியபடி, முதல் மாற்றத்தில் ஏற்படுகின்ற 'எமனேஷன்' அடிமட்ட ஆற்றல் நிலையில் இருப்பதில்லை என்றும், செயலூக்க நிலையில்தான் ஏற்படுகிறதென்றும், அது அந் நிலையிலிருந்து அடி நிலைக்கு வரும்போது இவ் விரு நிலைகளுக்குமிடையேயுள்ள ஆற்றல் வேறுபாட்டிற்கேற்ப γ கதிர்களையும் வெளிவிடுகிறதென்றும் அறியலாம். இவ்வாறே, தோரியம்—c கரு, தோரியம்—c" ஆகத் தேய்வுறுகிறபொழுது 5 குழு (Group) α கதிர்கள் கிடைக்கின்றன என அறிகிறோம். முதல் நான்கு குழுக் கதிரியக்கங்களில் Th—c" செயலூக்கம் பெற்ற நிலையில் கிடைக்கின்றன. கடைசிக் குழு, அடிமட்ட ஆற்றல் நிலைக்கு மாற்றம் ஏற்படுவதால் கிடைக்கிறது.



படம் 3·11.
ரேடியத்தின் தேய்வு முறை.

3·13 β- கதிரியக்கத் தேய்வு.

(அ) β- தேய்வு : (β-Decay)

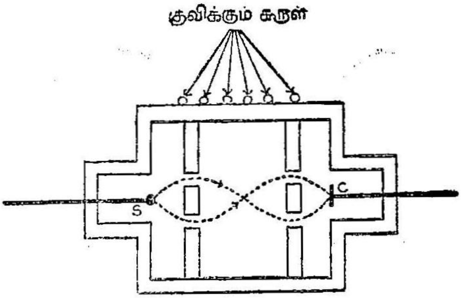
β-கதிரியக்கத்தினால் தேய்வடையும் அணுக்கரு, ஓர் எலக்ட்ரான் மின்னூட்டம் ஏற்கவோ அல்லது இழக்கவோ செய்கிறது. இயற்கைக் கதிரியக்கத்தின்போது எதிர் மின்னூட்டம் கொண்ட β-துகள்களை உமிழும் β-உமிழிகளைப் பற்றித்தான் விஞ்ஞானிகள் முதலில் அறிந்திருந்தனர். இத்தகைய கதிரியக்கத்தில் கருவின் மின்னூட்டம் ஓர் எலக்ட்ரான் மடங்கு அதிகமாகிறது. ($Z \rightarrow Z+1$) ஆனால், இப்பொழுது உறுதி நிலையில்லாத பல அணுக் கருக்கள் எலக்ட்ரான் அளவு நிறையும் அதே அளவு நேர் மின்னூட்டமும் கொண்ட பாசிட்ரான்களையும் உமிழ்கின்றன என்று கண்டுபிடிக்கப்பட்டிருக்கிறது. இம் மாற்றத்தில் கருவின் மின்னூட்டம் ஓரலகிற்குக் குறைகிறது. ($Z \rightarrow Z-1$) இந்த இரண்டு வகை β-தேய்வுகளைத் தவிர மூன்றாவதாக வேறொரு வகை β-கதிரியக்கமும் கண்டுபிடிக்கப்பட்டுள்ளது. இது 'எலக்ட்ரான் உட்கவர்ச்சி' (Electron Capture-K-Captture) என்றழைக்கப்படுகிறது. உறுதி நிலையிலில்லாத ஓர் அணுக்கரு பாசிட்ரானை உமிழ்வதற்குப் பதிலாக அணுவின் வட்டப் பாதைகளிலுள்ள எலக்ட்ரான்களில் ஒன்றைக் கவரக்கூடும். இந்த எலக்ட்ரான்கள் அனேகமாக அணுவின் *K*-கூட்டில்தான் இருக்கும். கருவானது அதன் அணுவின் *K* கூட்டில் உள்ள எலக்ட்ரானை உள்ளிழுத்தால் அதை *K* உட்கவர்ச்சி எனக் கூறுகின்றனர். இத்தகைய கவர்ச்சிகளில் வேறு எந்தத் துகளும் வெளிப்படுத்தப்படுவதில்லை. ஆகையால், இவற்றை $\beta+$, $\beta-$ உமிழ்வுகளை அறியப் பயன்படுத்தப்படும் முறைகளினால் விளக்கமுடியாது. இதை வேறு முறை

களைக் கொண்டே அறிய முடியும். ஓர் அணுக்கரு K எலக்ட்ரான் ஒன்றை உட்கவரும்போது K கூட்டில் ஒரு வெற்றிடம் உண்டாகிறது. இவ் வெற்றிடத்தை நிரப்புவதற்கு, L கூட்டிலிருந்து K கூட்டிற்கு ஓர் எலக்ட்ரான் தாவுகிறது. இத் தாவலினால் இவ் விரண்டு கூடுகளுக்கு இடையேயுள்ள ஆற்றல் வேறுபாட்டை ஒட்டி X கதிர் ஒன்று உண்டாகிறது. இது X கதிர் நிரலில் X தொடர்ச்சியில் உள்ள ஒரு வரிக்கோடாகும். இப்பொழுது L கூட்டில் ஏற்பட்டிருக்கும் வெற்றிடத்தை நிரப்ப மற்றோர் எலக்ட்ரான் வேறு கூட்டிலிருந்து விழும்போது, மற்றொரு X நிரல்கோடு உண்டாகின்றது. இத்தகைய கோடுகளைச் சோதனைமூலம் கண்டறியமுடியும். காட்டாக, $_{48}cd^{107}$ கரு K எலக்ட்ரானை உட்கவர்ந்து $_{47}Ag^{107}$ கருவாக மாறுவதை, பூல் (Pool), எட்வர்ட்ஸ் (Edwards), பிளாக் (Black) என்பவர்கள் 1945ஆம் ஆண்டு கண்டறிந்தனர். வெள்ளியில் K வரிக் கோடுகள் ஏற்படுவதை அவர்கள் சோதனை மூலம் மெய்ப்பித்தனர். இயற்கைக் கதிரியக்கத்தில் இவ் வகைக் கதிரியக்கம் பாசிட்ரான், எலக்ட்ரான் உமிழ்வுகளைப் போல அடிக்கடி நிகழ்வதில்லை என்றாலும் இதுவும் அவற்றைப்போன்று ஒரு முக்கியமான கதிரியக்கமாகும்.

கதிரியக்கப் பொருள்களிலெல்லாம் α கதிரியக்கப் பொருள்களைக் காட்டிலும் β கதிரியக்கப் பொருள்களே அதிக அளவில் இருக்கின்றன. α கதிர்களைப்போல் அல்லாமல், β கதிர்கள் தொடர்ச்சியான பாகுபாடு கொண்ட ஆற்றல்களைப் (Continuous Energy Distribution) பெற்றிருக்கின்றன; கதிரியக்கப் பொருள்களிலிருந்து உமிழப்படும் β கதிர்களின் பெரும ஆற்றலிலிருந்து சுழி ஆற்றல்வரைத் தொடர்ச்சியாக உள்ளது. எலக்ட்ரான்களின் நிறை குறைந்த மதிப்பை உடையதாக இருப்பதால், ஒரே அளவு ஆற்றல் படைத்த α கதிர்களைக் காட்டிலும் β கதிர்கள் அதிக திசை வேகங்களைக் கொண்டுள்ளன. குறிப்பாக 8 மி. எ. வோ. ஆற்றலுடைய β கதிர்கள் ஒளியின் திசை வேகத்தில் சுமார் நூற்றுக்குத் தொண்ணூற்று ஒன்பது பங்கு திசை வேகத்தைப் பெற்றிருக்கின்றன எனலாம். காற்றில் β கதிர்கள் ஏறத்தாழ 1 முதல் 10 மீட்டர்கள் வரையில் ஊடுருவும் அளவு ஆற்றல் பெற்றுள்ளன. ஆனால், இவை ஒரு சில மில்லி மீட்டர் தடிப்பே உள்ள அலுமினியத்தினால் முற்றிலும் தடுக்கப்பட்டு விடுகின்றன. எனவே, β கதிர்களின் ஆற்றல்களை அவை அலுமினியத்தில் ஊடுருவக்கூடிய தொலைவு அல்லது அலுமினியத்தில் அவற்றின் நெருக்கடி ஆகியவற்றைக் கொண்டு கணக்கிடலாம்.

(ஆ) ஆற்றல் நிரல்—β-கதிர் நிரல்மானி (β-Ray Spectrometer)

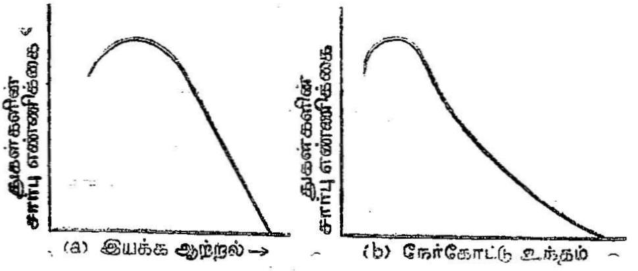
அலுமினியத்தினால் β கதிர்கள் அதிக அளவில் தடுக்கப்படுகின்றன என்றும், அவை அந்த உலோகத்தில் ஊடுருவிச் செல்கின்ற தொலைவையொட்டி அவற்றின் ஆற்றல்களைக் கணக்கிடலாம் என்றும் பார்த்தோம். இதைத் தவிர β கதிர்களின் ஆற்றல் அளவீட்டிற்காகவே நிறுவப்பட்ட காந்த β கதிர் நிரல்மானியைக் கொண்டும் இக் கதிர்களின் ஆற்றல்களை அளக்க முடியும். β-கதிர் நிரல்மானியின் படம் (3·12) கீழே உள்ளது.



படம் 3·12
β-கதிர் நிரல்மானி.
கதிரியக்கப்பொருள் S-லிருந்து உமிழப்படும்
குறிப்பிட்ட ஆற்றலுள்ள β-கதிர்களே சேர்ப்பியை வந்தடைய முடியும்
S-β-கதிர்மூலம் C-சேர்ப்பி

சிறிய அளவிலேயுள்ள S என்ற கதிரியக்கப் பொருளிலிருந்து உமிழப்படும் β-கதிர்களின் பாதை காந்தப் புலத்தினால் வளைக்கப்பட்டு C என்ற ஏற்பியை வந்தடைகின்றன. நிரல்மானியின்மீது சுற்றப்பட்டுள்ள மின்சுருளின் வழியாக மின்சாரம் பாய்வதால் காந்தப்புலம் உண்டாகிறது. S-லிருந்து வெளியேறும் கதிர்கள் காந்தப்புலத்திற்கு வெவ்வேறு கோணங்களில் வெளியேறுகின்றனவாகையால் ஏறத்தாழ அவையெல்லாம் வளைக்கப்படுகின்றன. இவ் வளைவினால் அவை சுருள்பாதையில் (Spiral path) படத்தில் காட்டியவாறு ஒரு முழுத் திருப்பம் கொண்டு செல்கின்றன. இவ் வளைவெல்லாம் கதிர்கள் ஏற்பியை அடைவதற்குள் ஏற்பட்டுவிடுகின்றன. A, B என்ற திரைகள் ஒரு குறிப்பிட்ட திசைவேகங்களைக் கொண்ட கதிர்களைத்தான் தன்னிடமிருந்து வழியே விடும்; மற்றக் கதிர்களை எல்லாம் தடுத்து விடும். இவ்வாறு திரையினூடே செல்லும் கதிர்களே சேர்ப்பியை அடையும். காந்தப் புலத்தின் வலிமையை மாற்றி வெவ்வேறு திசை வேகங்கள் கொண்ட கதிர்களின் ஆற்றல்களை அறியமுடியும்.

வெவ்வேறு திசைவேகங்களைக் கொண்ட துகள்களின் எண்ணிக்கை அவற்றின் திசைவேகங்கள் அல்லது ஆற்றல் இவற்றிற்கிடையே ஒரு வரைபடம் வரைந்தால், அது படம் (3·12)-ல் காட்டியது போல் இருக்கும். இவ் வகை வரைபடங்கள் ஒரு குறிப்பிட்ட ஆற்றலைக்கொண்ட துகள்களின் எண்ணிக்கை அவற்றின் ஆற்றல் அல்லது உந்தம் இவற்றிற்கிடையே வரையப்படுகின்றன. இவ் வரைபடத்திலிருந்து அதிக எண்ணிக்கையுடைய துகள்கள் பெருமத் திசை வேகத்திற்குக் குறைவான திசை வேகங்களையே கொண்டுள்ளன என அறிகிறோம்.



படம் 3·13
வெவ்வேறு திசைவேகம் கொண்ட துகள்களின் எண்ணிக்கைக்கும் அவற்றின் ஆற்றலுக்குமிடையே உள்ள தொடர்பின் வரைபடம்

3·14 (அ) நியூட்ரினோ:

β-கதிர்களின் தொடர்ச்சியான ஆற்றல் பாகுபாடு இயற்பியலில் பெரியதொரு புதிரை உண்டாக்கியது எனலாம். α-கதிர்களைப் போலவே, β-கதிர்களும் ஒரு குறிப்பிட்ட அணுக்கருவிலிருந்து குறிப்பிட்ட ஆற்றலுடைய கதிர்களாக வெளியேறும் என எதிர்பார்க்கப்பட்டது. ஆனால் β-கதிர்கள் கதிரியக்க மாற்றத்தில் ஏதேனும் ஓர் அளவு ஆற்றலைக் கொண்டு உமிழப் படுகின்றன. இது எப்படி நிகழக்கூடும் என்பது புலப்படாமலிருந்தது. தாய்க்கருவிலிருந்து சேய்க்கருவின் அடிமட்ட ஆற்றல் நிலைக்கு விழும்போது ஏற்படுகின்ற ஆற்றல் வேறுபாட்டை நுனிப்புள்ளி (End point) காண்பிக்கின்றதென்றால், இவ் வாற்றல் வேறுபாட்டைவிடக் குறைந்த ஆற்றல் கொண்ட β-கதிர்கள் எவ்வாறு தாய்க்கருவினின்றும் வெளிவருகின்றன என்பதும் தெரியாமலிருந்துவந்தது.

இவ் வகை மாற்றங்களில் ஆற்றல் மாறாக் கோட்பாட்டின் உண்மையை நிலைநாட்டுவதற்குத் தேவையான ஆற்றலை எவ்வாறு

சரிக்கட்ட முடியும் என்று ஆராயப்பட்டது. தவிர, β-கதிரியக்கத்தில் கோண உந்தமும் மாருமலிருக்க வேண்டும் என்பதும் புலப்பட்டது. β-துகள் எலக்ட்ரான் ஆகையால் அதன் கோண உந்தம்

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi}$$

ஆக இருக்க வேண்டும். ஆனால் இது

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi}$$

ஆக இல்லாமல் $h/2\pi$ ஆகவோ, சுழியாகவோ இருந்தது. இவற்றைச் சரிப்படுத்துவதற்கு β-கதிரியக்கத்தில் β-துகளைத் தவிர மற்ருெரு வகைத் துகளும் உமிழப்பட வேண்டுமென்று யூகிக்கப்பட்டது.

β-கதிரியக்கத்தில் மின்னூட்டமற்ற அமைதிநிலை நிறையைச் சுழியாகக் கொண்ட ஒரு துகள் β-துகளோடு உடன் உமிழ்படக் கூடும் என்று பவுலி (Pauli) என்ற விஞ்ஞானி யூகித்தார். ஆனால், ஃபெர்மி (Enrico Fermi) என்பவர் β-கதிரியக்கத்தை விளக்குவதற்குக் கொடுத்த கோட்பாட்டில் β-துகளுடன் மின்னூட்டமற்ற அமைதிநிலை நிறையைச் சுழியாகக் கொண்ட கோண உந்தம்

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi}$$

உடைய மற்ருெரு வகைத் துகள் உமிழப்பட வேண்டும் என்று திட்டவட்டமாகக் கூறினர்.

β-கதிரியக்கத்தை விளக்கக் கொடுக்கப்படும் எந்தக் கோட்பாடும் இந்தக் கதிரியக்கத்தில் நிறை, ஆற்றல், நேர்க்கோட்டு உந்தம், கோண உந்தம் ஆகியவற்றின் அழியாத் தன்மையை விளக்குவதோடு β-கதிர்களின் ஆற்றல் நிரலின் தொடர்ச்சியான தன்மை, முனைப்புள்ளி ஆற்றல், தேய்வு மாறிலி, மற்றும் சராசரி ஆற்றல் ஆகியவற்றை விளக்க வேண்டும். β-கதிரியக்கத்திற்கான ஃபெர்மியின் கோட்பாடு இவற்றை நன்கு விளக்கியது. இக் கோட்பாட்டினல் ஃபெர்மியின் மதிப்பு உலக விஞ்ஞான அரங்குகளில் அதிகமானது எனலாம்.

β-கதிரியக்கத்தில் தேய்வுறும் கருவின் மின்னூட்டமானது சேய்க்கரு, β-துகள் ஆகியவற்றின் கூட்டு மின்னூட்டத்திற்கும் சம

மாக உள்ளது. எனவே இந்தப் புதிய துகளான நியூட்ரினோ, மின்னூட்டமற்ற துகளாக இருக்க வேண்டுமென்பதும் பெறப்பட்டது. இதன் காரணமாகத்தான் இத் துகள் 'நியூட்ரினோ' என அழைக்கப்பட்டது. இதைத் தவிர, கதிரியக்கத்தில் β-துகள் வெளியேறும்போது, அத் துகளின் நிறையைவிட அதிகமான எந்த நிறைக் குறைவும் ஏற்படுவதில்லையாகையால் இப் புதிய துகளின் அமைதிநிலை நிறை சுழியாக இருக்கலாம் என்று யூகிக்கப்பட்டது. கோண உந்தம் மாறாக் கோட்பாட்டிற்கிணங்க, இத் துகள்

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi}$$

கோண உந்தத்தைக் கொண்டிருக்க வேண்டும் என்பதும் பெறப்பட்டது. நேர்க்கோட்டு உந்தத்தையும், ஆற்றலையும் தன்னிடம் சேர்த்துக்கொண்டு இத் துகள் வெளியேற வேண்டுமென முடிவு செய்யப்பட்டது. எனவே, β-கதிரியக்கத்தில் எலக்ட்ரானோடு மேற்கண்ட தன்மைகளைக் கொண்ட 'நியூட்ரினோ' என்ற துகளும் வெளியேறுகிறது என்று வைத்துக்கொண்டால், β-கதிரியக்கத்தை விளக்கும்போது ஏற்படுகின்ற மேலே கண்ட இடர்ப்பாடுகள் ஏறத்தாழ ஒழிந்துவிடுகின்றன எனலாம்.

நியூட்ரினோ

1. மின்னூட்டம் = 0
2. அமைதி நிலை நிறை = 0
3. தற்சுழற்சிக் கோண உந்தம் = $\frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$
4. நேர்க்கோட்டு உந்தம் = p
5. சார்பு கொள்கைப்படி ஆற்றல் = pc.
6. திசைவேகம் = c.
7. இதன் குறியீடு ν.

(ஆ) நியூட்ரினோ கண்டுபிடிப்பு

β-கதிரியக்கத்தை விளக்குவதற்காகப் புனையப்பட்ட நியூட்ரினோ என்ற துகள் உண்மையிலேயே இயற்கையில் உள்ளதா என்ற ஐயப்பாடு ஒரு சில நாள்களுக்கு முன் இருந்துவந்தது. அது பிற பொருள்களோடு ஓர் 'இடையீட்டுச் செயலுக்கும்' (Interaction) ஆளாவதில்லை. ஆகையால், இத் துகளைச் சோதனை மூலம் எளிதில் கண்டுபிடிக்க முடியவில்லை. கதிரியக்

கத்தில் β-துகள் உமிழப்படும்போது தாய்க் கருவின்மீது செயல்படும் பின்னுதைப்பு விசையிலிருந்து (Recoil force) இத் துகளைக் கண்டுபிடிக்கலாம் என்று நினைக்கப்பட்டது. β-கதிரின் பாதைக்கும், பின்னுதைத்துத் தள்ளப்படும் கருவின் திசைக்கும் இடையே உள்ள கோணங்களையும், அவற்றின் உந்தங்களையும் அளந்தால் இவற்றிலிருந்து நியூட்ரான் வெளியேறும் கோணத்தை ஒருவாறு அறியலாம் என்று முடிவு செய்யப்பட்டது. ஆனல், இச் சோதனைகளாலும் நியூட்ரினேவைக் கண்டுபிடிக்க முடியவில்லை.

எனினும் 1956ஆம் ஆண்டு, அமெரிக்காவின் லாஸ் ஆலமாஸ் (Los Alamos) சோதனைச் சாலையில் நியூட்ரினேவைக் கண்டுபிடிக்கப் பல முயற்சிகள் மேற்கொள்ளப்பட்டன. விஞ்ஞானிகள் அணு உலையிலிருந்து வெளியேறும் அடர்த்திமிக்க நியூட்ரான் கற்றைகளைக் காட்மியம் குளோரைடும், தண்ணீரும் கொண்ட ஒரு தொட்டியில் புகவிட்டனர். இத் தொட்டியைச் சுற்றிலும் அநேக ஒளிமின் பெருக்கிகளைப் (Photo multiplier) பொருத்தினர். மேற்கண்ட கலவையில் நியூட்ரான்கள் சேரும் போது ஏற்படும் செயலீட்டில் நேர் மின்னூட்டம் கொண்ட பாசிட்ரானும், எதிர் மின்னூட்டம் கொண்ட எலக்ட்ரானும் ஒன்ருேடொன்று சேர்ந்து, பொருள் அழிவு ஏற்பட்டு γ-கதிர்கள் உற்பத்தியாகின. இவை ஒளி மின் பெருக்கிகளைக்கொண்டு கண்டுபிடிக்கப்பட்டன. இதில் ஏற்படும் செயலீடுகளைக் கீழ்க் கண்ட சமன்பாடுகள் விளக்குகின்றன

$$1\ H^1 + \bar{\nu} \longrightarrow {}_0n^1 + {}_+e^0 \qquad \dots\ (3{\cdot}28)$$

$$_+e^0 + {}_-e^0 \longrightarrow 2\gamma \qquad \dots\ (3{\cdot}29)$$

$$cd^{113} + {}_0n^1 \longrightarrow cd^{114} + \gamma \qquad \dots.\ (3{\cdot}30)$$

இதில் $\bar{\nu}$ என்பது ஆன்டி நியூட்ரினே (Anti nutrino) என்ற துகளைக் குறிக்கின்றது. $_0n^1$ என்பது நியூட்ரானையும், γ என்பது γ-கதிரையும், $_-e^0$ என்பது எலக்ட்ரானையும், $_+e^0$ என்பது பாசிட்ரானையும் குறிக்கின்றன. செயலீடுகள் நிகழ்ந்தவுடனே கிடைக்கப்பெற்ற காமாக் கதிர்களின் மூலம் (இவ் வகைக் கதிர்கள் ஒருமணி நேரத்திற்குச் சில முறைகள்தாம் கிடைத்தன.) மேற்கண்ட செயலீடுகள் நிகழ்கின்றன என்று அறியலாம்.

இச் செயலீட்டில் நியூட்ரினே பங்குகொள்கிறது என்பதையும் அறியலாம். வேறு சில சோதனைச் சாலைகளிலும் இதைப் போன்ற சோதனைகள் நிகழ்த்தப்பட்டன. இவற்றிலிருந்து நியூட்

ரிநோ, ஆன்டிநியூட்ரிநோ என்ற துகள்கள் β-கதிரியக்கத்தில் எலக்ட்ரான், பாசிட்ரான் ஆகியவற்றுடன் உமிழப்பட வேண்டும் என்பது உறுதிப்படுத்தப்பட்டது.

3·15. β-கதிரியக்கத் தேய்வில் ஆற்றல் தொடர்புகள் (Energy Relations in β-Decay)

'நிறை-ஆற்றல்' அழியாக் கோட்பாட்டின்படி தாய்க் கருவின் நிறை-ஆற்றல் (1) சேய்க்கரு, (2) எலக்ட்ரான், (3) சேய்க்கருவின் இயக்கவாற்றல், (4) எலக்ட்ரான்-நியூட்ரிநோ இரட்டையின் இயக்கவாற்றல் ஆகியவற்றின் மொத்த நிறை-ஆற்றலுக்குச் சமமாக இருக்கவேண்டும். α-கதிரியக்கத்தில் α-துகளைத் தவிர வேறெந்தத் துகளும் வெளிப்படுவதில்லை ஆகையால், α-துகளும் சேய்க் கருவும் ஒன்றிற்கொன்று எதிர்த் திசையில் ஒரே உந்தத்தோடு செல்லவேண்டுமென்பது தெரிகிறது. α-துகள் அதிக நிறையைப் பெற்றிருப்பதால், எதிர்ப் புறத்தில் தள்ளப்படும் அல்லது பின்னுதைக்கப்படும் கருவும் அதிக அளவு ஆற்றலைத் தன்னுள் கொண்டு இயங்க வேண்டும். ஆனால், β-துகளோ பின்னுதைத்துத் தள்ளப்படுகின்ற கருவிற்கு எந்தக் கோணத் திசையிலும் செல்லலாம் என்பது விளங்குகிறது. இந்தத் திசைக்கோணம் β-துகளோடு வெளியேறும் நியூட்ரிநோவின் ஆற்றலையும், உந்தத்தையும் பொறுத்துள்ளது. β-துகளின் ஆற்றலும் α-துகளின் ஆற்றலைப்போல் பன்மடங்கு இருக்கும். β-துகளின் நிறை மிகக் குறைவாக இருப்பதால், பின்னுதைத்துத் தள்ளப்படும் கருவின் ஆற்றல் ஏறத்தாழச் சுழியாக இருக்கும். நியூட்ரிநோவானது குறிப்பிட்ட β-கதிரியக்க மாறுதலின் முனைப் புள்ளி ஆற்றலுக்கும் (End point energy) β-துகளின் ஆற்றலுக்குமுள்ள வேறுபாட்டையே தன் ஆற்றலாகக் கொண்டிருக்கும்.

எவ்வாறு அணுவில் தன் வட்டப் பாதையில் சுற்றிக் கொண்டிருக்கும் ஓர் எலக்ட்ரான், மற்றொரு வட்டப் பாதைக்குத் தாவுகின்றபொழுது ஒளி உமிழப்படுகின்றதோ (ஃபோட்டான்கள்), அவ்வாறே கருவில் ஒரு குறிப்பிட்ட புரோட்டான் நியூட்ரானாக மாறும்போது பாசிட்ரானும், ஒரு குறிப்பிட்ட நியூட்ரான் புரோட்டனாக மாறும்போது ஓர் எலக்ட்ரானும் உண்டாகின்றன என்று கொள்ளலாம். இவற்றோடு முறையே நியூட்ரிநோவும், ஆன்டி நியூட்ரிநோவும் உடன் உமிழப்படுகின்றன என்று முடிவு செய்யலாம். இச் செயலீடுகள் பின் கண்ட சமன்பாடுகளால் காண்பிக்கப்பட்டுள்ளன.

$$n \longrightarrow p + {}_{-}e^{0} + \bar{\nu} \qquad \ldots (3{\cdot}31)$$

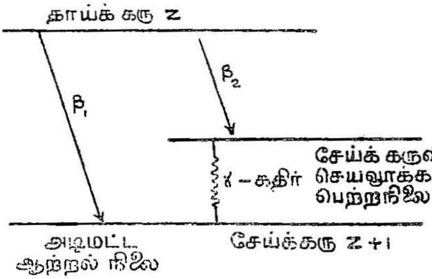
$$p \longrightarrow n + {}_{+}e^{0} + \nu \qquad \ldots (3{\cdot}32)$$

நியூட்ரானின் நிறை புரோட்டானின் நிறையைக் காட்டிலும் அதிகமாக இருப்பதால், நியூட்ரான் தனித்துள்ளபோதும் தேய்வடையக் கூடும். ஆனால், புரோட்டானின் மாற்றம் அவை மற்றத் துகள்களோடு அணுக்கருவில் சேர்ந்திருக்கும்போதுதான் ஏற்பட முடியும். பாசிட்ரான் கதிரியக்கமானது கதிரியக்கமடையும் கரு நிறையில் அதற்கடுத்துள்ள கருவின் (ஐசோடோப்பின்) நேர் மின்னூட்டத்தைவிட அதிகமாக இருந்தால் ஒழிய ஏற்படாது. இதைப் போலவே, 'எலக்ட்ரான் கதிரியக்கம்,' தேய்வடையும் கரு அதற்கடுத்துள்ள கருவின் மின்னூட்டத்தின் அளவைவிடக் குறைவாக இருக்க வேண்டும் என்பது தெளிவாகின்றது. சிற்சில கதிர்களின் ஐசோபார்களில் (ஒரே அணு நிறை எண் கொண்ட கருக்கள்) ஒன்றின் மின்னூட்டம் அதிகமாகவும், மற்றொன்றின் மின்னூட்டம் குறைவாகவும் உள்ளதால் இக் கருக்கள் கதிரியக்கத்தில் பாசிட்ரான்களையும், எலக்ட்ரான்களையும் உமிழக்கூடியவையாக உள்ளன. காட்டாக Cu^{64} கரு (தாமிரம்) எலக்ட்ரானை வெளிப்படுத்தி Zn^{64} (துத்தநாகம்) கருவாகவும், பாசிட்ரானை வெளியேற்றி Ni^{64} (நிக்கல்) கருவாகவும் மாறுகின்றது. அதாவது தாமிரம் கரு பாசிட்ரானையும் எலக்ட்ரானையும் உமிழ வல்லது என்று அறிகிறோம்.

தேய்வு முறைகள்

எவ்வாறு α-துகள் வெளியேற்றம் α-உமிழிகளின் ஆற்றல் மட்டங்களைப்பற்றித் தெரிவிக்கின்றனவோ அவ்வாறே β-கதிர் பெரும ஆற்றல் மட்டங்கள் β-உமிழிகளின் ஆற்றல் மட்டங்களைப் பற்றிய பல உண்மைகளை நமக்குத் தெரிவிக்கின்றன. சிற்சில சமயங்களின் β-கதிரை உமிழும் ஒரு குறிப்பிட்ட ஐசோடோப்பின் ஆற்றலைப் பொறுத்துப் பல கிளைக் கதிர்களை உமிழ இயலும். ஒவ்வொரு 'கிளைக்கும்' ஒரு குறிப்பிட்ட முனைப்புள்ளி ஆற்றல் அல்லது பெரும ஆற்றல் உண்டு. ஒவ்வொரு கிளையிலும் சுழி ஆற்றலிலிருந்து பெரும ஆற்றல்வரை ஆற்றல்கள் கொண்ட துகள்கள் இருக்கும். படம் 3·14-ல் Z அணு எண் கொண்ட கதிரியக்கக் கரு ஒன்றின் தேய்வுமுறைகள் (Decay schemes) கொடுக்கப்பட்டிருக்கின்றன. இது இரு கிளை β-கதிர்களை உமிழ்கின்றது. சேய்க்கரு அணுஎண் $Z+1$ கொண்டிருத்தலைப் படத்தில் காணலாம். β_1 கிளையில் β-கதிர்கள் அதிக அளவில் ஆற்றலுடன் உமிழப்படுவதால், சேய்க்கரு இம் மாற்றத்தில் தன் அடிமட்ட

ஆற்றல் நிலைக்குச் சென்றுவிடுகிறது. ஆனால், β_2 கிளையில் β-கதிர்கள் மேற்கண்ட அளவிற்கு ஆற்றல் இன்றி இருப்பதால், சேய்க்கருவின் செயலூக்கம் பெற்ற ஓர் ஆற்றல் மட்டத்திற்குத் தான் செல்லமுடிகிறது. அங்கிருந்து γ-கதிரை உமிழ்ந்து சேய்க்கரு அடிமட்ட ஆற்றல் நிலைக்கு வந்துவிடுகிறது.



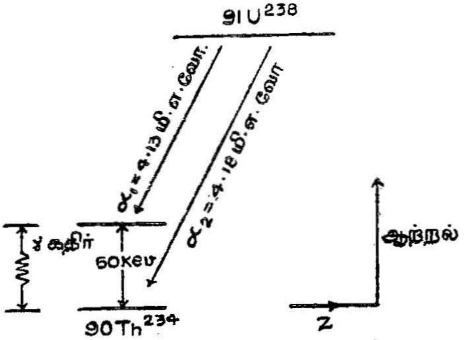
படம் 3·14
அணு எண் Z கொண்ட கருவிலிருந்து உமிழப்படும் இருவகை β-கதிர்கள் - தேய்வுமுறை

γ-கதிரியக்கம்

3·16. முன்னுரை

அணுக்கருக்கள் α, β-துகள்களைத் தவிர, மற்றும் ஒருவகைக் கதிர்களை உமிழ்கின்றன என்று முன்பே பார்த்தோம். இக் கதிரியக்கத்தில் அணுஎண் Z-ன் மதிப்போ அல்லது அணுநிறை எண் A-ன் மதிப்போ மாறுவதில்லை. இக் கதிரியக்கம் 'γ-கதிரியக்கம்' என்று அழைக்கப்படுகிறது. இவை X-கதிர்கள், புற ஊதாக்கதிர்கள் போன்ற மின்காந்த அலைகளே. இவை சுழி மின்னூட்டமும் சுழிநிறையும் கொண்டவை ஆகையால் இக் கதிரியக்கத்தில் கருவின் Z, A மதிப்புகளில் ஒரு மாற்றமும் ஏற்படுவதில்லை. இருந்தபோதிலும், எந்த அளவிற்குக் கதிரியக்கம் இயக்கவாற்றலைப் பெற்றிருக்கின்றதோ அந்த அளவிற்குக் கருவின் நிறையில் குறைவு ஏற்படத்தான் செய்கிறது. அநேகமாக அணுக்கரு α-கதிரியக்கமோ அல்லது β-கதிரியக்கமோ அடைகின்றபோது கருவானது செயலூக்கம் பெற்ற நிலையிலிருந்து ஆற்றல் அடிமட்ட நிலையை அடைகிறது. இம் மாற்றம் முற்றிலும் நேரடியாக நிகழ்வதில்லை. உமிழப்பட்ட α-துகள்கள் செயலூக்கம் கொண்ட நிலையிலிருந்து γ, ஃபோட்டானை உமிழ்ந்து ஆற்றல் அடிமட்ட நிலைக்கு வருகின்றது எனலாம். எடுத்துக்காட்டாக,

U^{238} கருவின் கதிரியக்கத்தில் 77 விழுக்காடு 4·18 மி. எ. வோ. ஆற்றல் கொண்ட α-துகள்களையும், 23 விழுக்காடு 4·13 மி.எ.வோ. ஆற்றல் கொண்ட α-துகள்களையும் உமிழ்கின்றது. 4·13 மி.எ.வோ. ஆற்றல் கொண்ட α-துகள்கள் உமிழப்படும்போது 4·18 மி. எ. வோ. α-துகளைவிட 0·05 மி.எ.வோ. அதிக ஆற்றலைக் கரு தன்னிடத்தில் வைத்துள்ளது. இந்த 0·05 மி. எ. வோ. ஆற்றல் வேறுபாடு அதே ஆற்றல் கொண்ட γ-கதிராக வெளிவருகிறது. இது படம் 3·15-ல் காட்டப்பட்டுள்ளது.



படம் 3·15

U^{238}, Th^{234} கருவாகத் தேய்கின்றபொழுது ஏற்படுகின்ற ஆற்றல் மாற்றங்கள் 4·18, 4·13 மி.எ.வோ. α-துகள்களும் 0·05 மி.எ.வோ. γ-கதிர்களும் வெளிவருகின்றன.

ஏறத்தாழ எல்லாக் கதிரியக்கங்களிலும் α-துகளோ அல்லது β-துகளோ உமிழப்படும்பொழுது γ-கதிர்களும் உமிழப்படுகின்றன. ஆனால், சிற்சில கருக்கள் செயலூக்கம் பெற்ற நிலையில் குறிப்பிட்ட ஆனால் அளவிடக்கூடிய நேரத்திற்குக் கதிரியக்கமடையாது நிற்கின்றன. இந்த நிலையில் கருவானது 'ஐசோமெரிக்' (Isomeric) நிலையில் உள்ளதாகக் கருதப்படும்.

3·17. γ-கதிர்களின் அலைநீளங்களை அளத்தல் (Measurement of wavelength of γ-rays)

கதிரியக்கப் பொருள்களால் உமிழப்படும் γ-கதிர்களின் அலைநீளங்கள் சுமார் 0·004 ஆங்ஸ்ட்ராம் அலகுகளிலிருந்து 0·4 ஆங்ஸ்ட்ராம் அலகுகள் வரையில் உள்ளன. இக் கதிர்களின் அலைநீளங்களை அளப்பதற்கு இரண்டு முறைகள் கையாளப்படுகின்றன.

(அ) படிக நிரல்மானி முறை (Crystal spectrometer)

இம் முறை 0·1 Å அலகுகளுக்கு அதிகமான γ-கதிர்களின் அலைநீளங்களை அளப்பதற்குப் பயன்படுத்தப்படுகிறது. குறைவான அலைநீளங்களுக்கு மிகக் குறைந்த சரிவுக் கோணங்களே கிடைப்பதால் மிகத் துல்லியமாக அலைநீளங்களை அளக்கமுடிவதில்லை. X-கதிர்களின் அலைநீளங்கள் எவ்வாறு பிராகின் நிரல்மானியைக் கொண்டு அளக்கப்படுகின்றனவோ, அவ்வாறே, அதிக அலைநீளம் கொண்ட γ-கதிர்களின் அலை நீளங்களும் அளக்கப்படலாம்.

(ஆ) காந்த நிரல்மானி முறை (Magnetic spectrometer)

அலைநீளங்கள் அளக்கப்படவேண்டிய γ-கதிர்களை ஓர் இலக்கின்மீது மோதி, இம் மோதலினால் வெளிவரும் எலக்ட்ரானின் ஆற்றல்கள் காந்த நிரல் மானியைக் கொண்டு அளக்கப்படுகின்றன. இலக்கு அணுக்களில் உள்ள வட்டப் பாதையில் சுற்றிக்கொண்டிருக்கும் எலக்ட்ரான்களின் ஆற்றல் மட்டங்கள் தெரியுமானால் அணுக்களின்மீது மோதுகின்ற γ-கதிர் ஃபோட்டான்களின் ஆற்றல்களைச் சுலபமாகக் கணிக்கலாம்.

3·18. பொருள்களில் γ-கதிர்களின் உட்கவர்ச்சி

குறைந்த ஆற்றல் படைத்த γ-கதிர்கள் பொருள்களினூடே செல்லும்போது, X-கதிர்களைப் போலவே உட்கவர்ச்சியும், சிதறலும் அடைகின்றன. அதிக ஆற்றல் பெற்ற, ஆனால் 1 மி. எ. வோ.க்குக் குறைந்த ஆற்றல் உள்ள γ-கதிர்கள் பொருள்களால் உட்கவரப்பட்டு ஒளிமின் மாற்றத்தையும், காம்ப்டன் விளைவையும் உண்டாக்கும். இக் கதிர்களின் பெரும்பாலான ஆற்றல் இழப்பு காம்ப்டன் விளைவினால் உண்டாகிறது எனலாம்.

1 மி. எ. வோ.க்கும் அதிகமான ஆற்றல் பெற்ற γ-கதிர்கள் பொருள்களினூடே செல்லும்பொழுது ஒரு புதிய உட்கவர்ச்சி நிகழ்கிறது. இந்த உட்கவர்ச்சி ஃபோட்டானின் ஆற்றல் அதிகமாகும்போது அதையொட்டி அதிகமாகிறது. இந்த அளவு ஆற்றல் படைத்த γ-கதிர் உட்கவரும் ஊடகத்திலுள்ள அணுக்கருவிற்கு அருகில் செல்லும்போது எலக்ட்ரான்-பாசிட்ரான் இணையாக மாறுகின்றது. இந் நிகழ்ச்சியை ‘இணை உற்பத்தி’ (pair production) என்று அழைக்கின்றனர். இதனைப் பின் கண்ட சமன்பாடு விளக்குகின்றது.

$$h\nu \rightarrow {}_{-1}e^{0} + {}_{+1}e^{0} \qquad (3.33)$$

இதில் $_{-1}e^0$ என்பது எலக்ட்ரானையும் $_{+1}e^0$ என்பது பாசிட்ரானையும் குறிக்கின்றன. பாசிட்ரானின் சுழி இயக்க நிறை எலக்ட்ரானின் சுழி இயக்க நிறைக்குச் சமம். ஓர் எலக்ட்ரானின் சுழி இயக்க நிறையை

$E = m_0 c^2$ என்ற சமன்பாட்டிலிருந்து தருவிக்கலாம்.

$E = 9{\cdot}1 \times 10^{-28} \times (3 \times 10^{10})^2$ எர்குகள்.

$= \dfrac{9{\cdot}1 \times 10^{-28} \times 9 \times 10^{20}}{1{\cdot}6 \times 10^{-6}}$ மி. எ. வோ.

$= 0{\cdot}51$ மி. எ. வோ.

எனவே, பாசிட்ரானின் சுழி இயக்க நிறையும் 0·51 மி.எ.வோ. ஆகும். ஆகவே, ஓர் எலக்ட்ரான்-பாசிட்ரான் இணை உற்பத்திக்கு வேண்டிய சிறும ஆற்றல் 0·51+0·51=1·02 மி.எ.வோ. ஆகும். எனவே, 1·02 மி.எ.வோ.-க்கும் அதிகமான ஆற்றல் படைத்த γ-கதிர்கள் அதிக அணு எண் கொண்ட தனிமங்களில் ஊடுருவிச் செல்லும்போது இந்த எலக்ட்ரான் பாசிட்ரான் இணை உற்பத்தியாவதற்குச் சாதகமாகிறது. இந் நிகழ்ச்சியில் கதிரியக்கமானது பொருளாக மாற்றப்படுகிறது எனலாம். இது பொருளாக்கம் (Materialisation) எனப்படுகின்றது. இவ்வாறே, ஒரு பாசிட்ரானும் ஓர் எலக்ட்ரானும் சேர்ந்து ஒரு γ-ஃபோட்டான் உண்டாகிறது என்பது சோதனை மூலம் கண்டுபிடிக்கப்பட்டுள்ளது. இது 'பொருளின் அழிவு' எனப்படுகின்றது.

3·19. கதிரியக்கத்தின் மூலம் கால அளவுகளை நிர்ணயித்தல்

(அ) கதிரியக்கக் கரியைக் கொண்டு கால அளவுகளைக் கணக்கிடல்: நைட்ரஜன் வாயுவைக் குறைந்த திசைவேகம் கொண்ட நியூட்ரான்களைக்கொண்டு தாக்கினால் கதிரியக்கமுடைய (c^{14}) ஐசோடோப்பு கிடைக்கிறது.

$${}_7N^{14} + {}_0n^1 \rightarrow {}_6c^{14} + {}_1H^1 + 0{\cdot}6 \text{ மி. எ. வோ.} \quad \ldots \quad (3.34)$$

இச் செயலீடு மிகவும் முக்கியத்துவம் வாய்ந்ததாகும். இச் செயலீடு உடலிலுள்ள திசுக்களில் நடைபெறுகின்றபொழுது அதிக வேகங்கள் கொண்ட புரோட்டான்கள் கிடைக்கின்றன. இவை சில நோய்களைக் குணப்படுத்தும் சக்தியைப் பெற்றிருக்

கின்றன. கதிரியக்கமுடைய கரி (c^{14}) எலக்ட்ரானை உமிழ்ந்து தேய்வுறுகின்றன.

$$_{6}c^{14} \longrightarrow {_7}N^{14} + {_{-1}}e^{0} \qquad \ldots \quad (3\cdot35)$$

c^{14} ஐசோடோப்பின் அரை வாழ்வுக்காலம் 5568 ± 30 ஆண்டுகள். எனவே, இது உயிரியல் ஆராய்ச்சியிலும், பெட்ரோலியப் பொருள்களைப்பற்றிய ஆராய்ச்சியிலும் ட்ரேசர் (Tracer) தனிமமாகப் பயன்படுத்தப்பட்டுவருகிறது.

இவற்றைத் தவிர, கதிரியக்கமுடைய c^{14} ஐசோடோப்பு மண் பொருள் ஆராய்ச்சி, புதைபொருள் ஆராய்ச்சி ஆகியவற்றில் பயன்படுத்தப்பட்டுவருகிறது. காஸ்மிக் கதிர்களினின்று இயற்கையாகக் கிடைக்கின்ற குறைந்த வேகமுடைய நியூட்ரான்கள் வளிமண்டலத்திலுள்ள நைட்ரஜன் வாயுவோடு மோதுகின்றபோது சமன்பாடு (1)-ன் படி கதிரியக்கமுடைய c^{14} ஐசோடோப்பு உண்டாகின்றது.

வாழும் தாவர, உயிரினங்கள் வளிமண்டலத்திலிருந்து மாருத அளவு c^{14} தனிமத்தையுடைய கார்பன்-டை-ஆக்ஸைடை உட்கொள்கின்றபடியால் அவற்றில் c^{14} அடர்த்தி மாருதிருக்கும். ஆனல், இவ் வுயிரினங்கள் இறந்த பின்னர் அவற்றில் இருக்கும் c^{14} அணுக்கள் கதிரியக்கத்தினுல் தேய்வுற ஆரம்பிக்கின்றன.

இப்பொழுது இறந்த தாவரங்களிலிருந்து நமக்குக் கிடைக்கும் கட்டை, அடுப்புக்கரி, காகிதம் போன்ற பொருள்களில் நாம் கதிரியக்கத்தை அளக்கலாம். அதாவது 't' வருடங்களுக்குப் பின்னர் இத்தகைய அளவீடு செய்யப்படுகிறதெனக் கொள்வோம். கதிரியக்கத் தேய்வு விதியிலிருந்து

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \text{ அல்லது } \log N = \log N_0 - \lambda t$$

என்று நாம் அறிவோம்.

$\lambda = 0\cdot6971/T_{\frac{1}{2}}$ என்பதைப் பயன்படுத்திஞேமாஞல்

$$\log_{10} N = \log_{10} N_0 - \frac{0\cdot6931}{2\cdot303} \cdot \frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$$

$$= \log_{10} N_0 - 0\cdot3010 \frac{t}{T_{\frac{1}{2}}} \qquad \ldots \quad (3\cdot36)$$

இதில் N_0 என்பது தாவர உயிரினங்கள் இறக்கின்றபொழுது உள்ள செயலூக்கத்தையும், N என்பது தற்போது உள்ள செயலூக்கத்தையும் குறிக்கும்.

எண்ணிகளைக் கொண்டு N_0, N இவைகளை அளவிட்டோமானால் t-ன் மதிப்பைக் கணக்கிடலாம். இம் மதிப்பீடுகள் மிகத் துல்லியமானவை என்று கூறமுடியாவிட்டாலும் கால அளவுகளைத் தீர்மானிக்கும் ஒரு முறை என்ற அளவிற்கு இது முக்கியம் வாய்ந்தது எனலாம்.

(ஆ) புவியின் வயது: புவியிலுள்ள பாறைகள் பூமி தோன்றிய காலத்திலிருந்தே தோற்றம் பெற்றவை எனக் கொண்டு பாறைகளின் வயதைக் கணக்கிடுவதன் மூலமாகப் புவியின் வயதினை நாம் கணக்கிடலாம். ஒரு பாறை தோன்றிய காலத்திலேயே அதில் கதிரியக்கப் பொருளும் தோன்றியிருப்பதாகக் கொண்டால் கதிரியக்கத் தேய்வு விதியான $N_t = N_0 e^{-\lambda t}$ என்ற கோவையைப் பயன்படுத்திப் பாறைகளிலுள்ள கதிரியக்கப் பொருள்களின் வயதினைக் கணக்கிடலாம். 't' வினாடி நேரத்தில் மாற்றப்பட்ட தொடக்கத் தனிம அணுக்களின் எண்ணிக்கை $(N_0 - N_t)$ என்றால், இந்த அணுக்கள் நீண்ட கால இடைவெளியில் பல மாறுதல்களுக்குள்ளாகி இறுதியில் ஒரு நிலையான ஐசோடோப்பாக இருக்கும். நிலையான ஐசோடோப்பு அணுக்களின் இறுதி எண்ணிக்கை

$$N_s = N_0 - N_t = N_t\ e^{+\lambda t} - N_t$$

$$= N_t\,(e^{\lambda t} - 1) \qquad \ldots \quad (3{\cdot}37)$$

மேற்கண்ட சமன்பாட்டில் N_t என்பது t காலத்திற்குப் பின்னர் எஞ்சியிருக்கும் தொடக்க அணுக்களின் எண்ணிக்கையாகும். N_t-ன் மதிப்பும், அணுவின் தேய்வு மாறிலி λ-வின் மதிப்பும் தெரியுமானால் 't'-ன் மதிப்பைக் கணக்கிடலாம்.

சாதாரணமாகச் சோதனைச் சாலையில் காரீயம்-யுரேனியம் முறை புவியின் வயதைக் கண்டுபிடிக்கக் கையாளப்படுகிறது. ${}_{92}U^{238}$, ${}_{92}U^{235}$, ${}_{81}Pb^{204}$, ${}_{82}Pb^{206}$, ${}_{82}Pb^{207}$, முதலிய நியூக்லைடுகள் கொண்ட பாறை ஒன்று எடுத்துக் கொள்ளப்படுகிறது. தோரியம் தனிமம் தேய்வுறுவதிலிருந்து கிடைக்கும் காரீயம் ${}_{82}Pb^{208}$, தோரியமற்ற பாறைகளை எடுத்துக் கொள்வதன்மூலம் தவிர்க்கப்படுகிறது. காரீயத்தின் மற்ற ஐசோடோப்புகளில் ${}_{82}Pb^{204}$ நான்கு தொடர்ச்சியான கதிரியக்கங்களிலும் காணப்படுவதில்லையாகையால் இது கதிரியக்கப் பண்

பற்ற மூலக ஈயமாகத்தான் இருக்க வேண்டும். $_{82}Pb^{206}$ ஐசோடோப்பும், $_{82}Pb^{207}$ ஐசோடோப்பும் முறையே $_{92}U^{238}$, $_{92}U^{235}$ நியூக்ளிடுகளிலிருந்து பெறப்படுகின்றன. $_{92}U^{238} \rightarrow$ $_{82}Pb^{206}$ தேய்விற்குச் சமன்பாடு 3·37-ஐப் பயன்படுத்தினால்

$$N_{206} = N_{238}(e^{\lambda t} - 1) \qquad \ldots \quad (3{\cdot}38)$$

என்ற சமன்பாடு கிடைக்கும்.

இதில் N_{206} என்பது உறுதிநிலையிலுள்ள $_{82}Pb^{206}$ ஐசோடோப்பினது நியூக்ளிடுகளின் எண்ணிக்கையையும், N_{238} என்பது நியூக்ளிடுகளின் தற்போதைய எண்ணிக்கையையும் குறிக்கும். λ_1 என்பது $_{92}U^{238}$ கருவின் சிதைவு மாறிலியாகும்.

U^{238} கருவின் அரை வாழ்வுக் காலம் $T_{\frac{1}{2}}^{238} = 4{\cdot}5 \times 10^9$ ஆண்டுகள்

$$\text{எனவே,} \quad \lambda_1 = \frac{0{\cdot}693}{T_{\frac{1}{2}}^{238}} = 4{\cdot}87 \times 10^{-8} \text{ விநாடி}^{-1}$$

மேற்கண்டவாறே, $_{92}U^{235} \longrightarrow {}_{82}Pb^{207}$ சிதைவுக்கும்

$$N_{207} = N_{235}\,(e^{\lambda_2 t} - 1) \qquad \ldots \quad (3{\cdot}39)$$

என்ற சமன்பாட்டைப் பெறலாம்.

U^{235} கருவின் அரை வாழ்வுக் காலம்

$T_{\frac{1}{2}}^{235} = 7{\cdot}13 \times 10^8$ ஆண்டுகள்.

இதிலிருந்து $\lambda_2 = 3{\cdot}08 \times 10^{-17}$ விநாடி$^{-1}$ என்பதைப் பெறலாம். 3·38 சமன்பாட்டை 3·39 சமன்பாட்டால் வகுத்தால்,

$$\frac{N_{206}}{N_{207}} = \frac{N_{238}}{N_{235}} \left[\frac{e^{\lambda_1 t} - 1}{e^{\lambda_2 t} - 1} \right]$$

$$= 137{\cdot}8 \left[\frac{e^{\lambda_1 t} - 1}{e^{\lambda_2 t} - 1} \right] \qquad \ldots \quad (3{\cdot}40)$$

ஒரு நிறைநிரல் மானியைக் கொண்டு தற்போதைய ஈய விகிதம் N_{206}/N_{207}-ன் மதிப்பைப் பெறலாம்.

λ_1, λ_2 ஆகியவற்றின் மதிப்புகளைச் சமன்பாடு 3·40-ல் சரியீடு செய்து t-ன் மதிப்பைப் பெறலாம். இது பாறை தோன்றி யுரேனியம் தேய்வுற ஆரம்பித்ததிலிருந்து நிலையான அமைப்பை

அடையும்வரை உள்ள காலமாகும். இதுவே பாறையின் வயது எனலாம். இம் முறையினுல் கணக்கிடப்பட்ட புவியின் வயது $(4{\cdot}55 \pm 0{\cdot}7) \times 10^9$ ஆண்டுகளாகும்.

வினுக்கள்

1. 'இயற்கைக் கதிரியக்கம்' என்ருல் என்ன ? கதிரியக்கப் பொருள்களிலிருந்து எவ்விதக் கதிர்கள் உமிழப்படு படுகின்றன ? அக் கதிர்களின் பண்புகள் யாவை ?

2. 'கதிரியக்கத் தேய்விற்'கான சமன்பாட்டைத் தருவி. இச் சமன்பாட்டிலிருந்து ஒரு கதிரியக்கப் பொருளின் 'சராசரி வாழ்வுக் காலம்', 'அரை வாழ்வுக் காலம்' இவற்றிற்கான கோவைகளைக் கொடுக்க.
   ஒப்புச் செயலூக்கம் (Specific Activity) $2{\cdot}407 \times 10^8$ சிதைவுகள்/விஞடி கொண்ட U^{234} அணுவின் 'அரை வாழ்வுக்' காலத்தைக் கணக்கிடுக.

3. 'தொடர்ச்சியான கதிரியக்கம்' என்ருல் என்ன ? அதன் கோட்பாடுகளை விளக்குக. அதிலிருந்து கதிரியக் கப் பொருள்களின் 'காலத்தில் மாருத சமநிலை'க்கான (Secular Equilibrium) நிபந்தனைகளைத் தருவி.

4. α-துகளின் 'நெடுக்கம்' என்பதை வரையறு. 'கெய்கர் நட்டால் விதி' என்ருல் என்ன? அதன் முக்கியத்துவம் என்ன ?

5. கதிரியக்கப் பொருள்களின் β-கதிர் நிரல்கள் எவ்வாறு சோதனைகளால் நிறுவப்பட்டன ? இச் சோதனைகளின் விளைவுகளிலிருந்து, அணுக்கரு மாற்றங்களிலுள்ள 'ஆற்றல் அழியாக் கோட்பாடு' எவ்வாறு விளக்கப் படுகிறது ?

6. γ-கதிர்களின் தன்மைகளையும் அவற்றின் தோற்றுவாயை யும் விளக்குக.

7. (i) ஒரு கியூரி, (ii) ஒரு ருதர்ஃபோர்டு கதிரியக்கத்தைக் கொண்ட RaB (Pb^{214}) அணுவின் நிறையைக் கணக் கிடுக. RaB அணுவின் அரை வாழ்வுக் காலம் $26{\cdot}8$ நிமிடங்கள்.

8. 1.39×10^{10} ஆண்டுகள் அரை வாழ்வுக் காலம்கொண்ட தோரியம் அணுவின் 'தேய்வு மாறிலியையும்', 'சராசரி வாழ்வுக் கால'த்தையும் கணக்கிடுக.

9. ஒரு யுரேனியத் தனிமத்தில் 'காலத்தில் மாறுத சமநிலை' உண்டாகியிருக்கிறது. இதில் தாய்த்தனிமம் யுரேனியம்-I அணுக்கள்; சேய்த்தனிமம் ரேடியம் அணுக்கள். ஒவ்வொரு ரேடியம் அணுவிற்கும் 2.8×10^{6} யுரேனியம்-I அணுக்கள் உள்ளன. ரேடியத்தின் அரை வாழ்வுக் காலத்தை 1620 ஆண்டுகள் என்று கொண்டு யுரேனியம்-I தனிமத்தின் அரை வாழ்வுக் காலத்தைக் கணக்கிடுக.

10. 27°C வெப்பநிலை, 50 செ. மீ. பாதரச அழுத்தம் உடைய காற்றில், 15 மி. எ. வோ. ஆற்றல் கொண்ட α-துகளின் நெடுக்கம் எவ்வளவாக இருக்கும்?

4. கதிரியக்கக் காட்டிகளும் எண்ணிகளும்
(Particle Detectors and Counters)

4·1. முன்னுரை

பொருள்களில் அதிக அளவிற்கு ஊடுருவும் தன்மை வாய்ந்த கதிர்களைக் காண்பதற்கான அநேக சாதனங்கள் இப்பொழுது நடைமுறையில் பயன்படுத்தப்பட்டுவருகின்றன. இக் கதிர்கள் இயற்கைக் கதிரியக்கத்தில் உமிழப்படுவனவாக இருக்கலாம்; அணு உலைகளிலிருந்து கிடைப்பனவாக இருக்கலாம்; துகள் ஒடுக்கிகளிலிருந்து வெளியேறுவனவாக இருக்கக் கூடும்; அல்லது வெளி அண்டங்களிலிருந்து தொடர்ச்சியாகப் பூமியை நோக்கி வந்து அதோடு தொடர்ந்து மோதுகின்ற 'காஸ்மிக் கதிர்'களாகவும் இருக்கலாம். இக் கதிர்களைக் கண்டறியும் பொருட்டு நிறுவப்பட்டுள்ள கருவிகளெல்லாம் ஒரே மாதிரியானவையே என்று கூறின் அது மிகையாகாது. சாதாரணமாக, அதிகத் திசைவேகம் கொண்ட, பொருள்களில் அயனியாக்கத்தை உண்டாக்கும் பண்பு பெற்ற துகள்கள் அல்லது கதிர்கள் பல உள்ளன. எலக்ட்ரான்கள் (β-கதிர்கள்), பாசிட்ரான்கள், புரோட்டான்கள், α-கதிர்கள், γ-கதிர்கள், டியூட்ரான்கள், மீசான்கள் இத்தகைய துகள்-கதிரியக்கங்களுக்கு எடுத்துக் காட்டாகும். ஒரு துகளையோ அல்லது கதிரியக்கத்தையோ கண்டுபிடிப்பதற்கு அதற்கே உரிய பண்புகளில் ஒன்றைத்தான் நாம் பயன்படுத்தவேண்டும். இப் பண்புகளில் சில கீழே தரப் பட்டுள்ளன!

(அ) துகள் அல்லது கதிர் வாயுக்களில் ஊடுருவிச் செல்லும் போது அவை செல்லும் பாதையில் அயனியாக்கத்தை உண்டாக்க வல்லன. இப் பண்பினைக் கொண்டு குறிப்பிட்ட கதிரியக்கத்தைக் கண்டறியலாம்.

(ஆ) இவை சில பொருள்களின்மேல் படும்போது பொருள் களில் 'மிளிர்தல்' (scintillation) ஏற்படுகின்றது. இந்த மிளிர்தலைக் கொண்டும் இவற்றைக் கண்டுபிடிக்கலாம்.

(இ) இவை தனிப் பண்புகள் கொண்ட புகைப்படக் கூழ்களின்மீது விழும்போது, அவற்றில் 'பாதைச் சுவடுகளை' (tracks) உண்டாக்குகின்றன. இச் சுவடுகளை நுண்ணோக்கிகள் கொண்டு உற்றுநோக்கியும் இவற்றைக் கண்டுபிடிக்கலாம்.

கதிரியக்கத்தைக் கண்டறிய முதன் முதலாகப் பயன்படுத்தப்பட்ட சாதனம் 'தங்க இலை மின்காட்டி'யே (Gold Leaf Electroscope) ஆகும். மின்னூட்டம் பெற்ற தங்க இலை மின்காட்டியின் தங்க இலைகளுக்கு இடையேயுள்ள விலக்கமானது இத் துகள்கள் மின்காட்டியில் படும்போது ஒரு சிறிது குறைகிறது. இச் சுருக்கம் கண்டுபிடிக்கப்படவேண்டிய துகளின் ஆற்றலுக்கு நேர்விகிதத்தில் அமைகிறது. இச் சுருக்கம் கதிரியக்கத்தின் செயலூக்கத்தைக் குறிப்பதாகக் கொள்ளலாம். ராக்கெட்டுகள் கண்டுபிடிக்கப்படாததற்கு முன்பு இத்தகைய தங்க இலை மின்காட்டிகள்தாம் பலூன்களில் பொருத்தப்பட்டு, காஸ்மிக் கதிர்களின் தன்மைகளை அறியும்பொருட்டு, அதிக உயரங்களுக்கு அனுப்பப்பட்டன:

இப்பொழுது துகள் அல்லது கதிரியக்கத்தைக் காண்பதற்கும், அவற்றின் செயலூக்கங்களை அளப்பதற்கும் நடைமுறையில் பயன்படுத்தப்பட்டுவரும் சாதனங்களில் சில கீழே கொடுக்கப்பட்டுள்ளன.

1. அயனிக்கலம் (Ionisation Chamber)
2. கெய்கர்-மியூலர் குழாய்கள் (Geiger-Müller Tubes)
3. வில்சனின் மேகக்கலம் ((Wilson's Cloud Chamber)
4. குமிழ்க்கலம் (Bubble Chamber)
5. அணுக்கருப் புகைப்படக் கூழ் முறைகள் (Nuclear Emulsion Techniques)
6. குறைகடத்தி காட்டிகள் (Semi-Conductor Detectors)
7. மிளிர்தல் எண்ணிகள் (Scintillation Counters)
8. செரென்கோஃப் காட்டிகள் (Cerenkou Detectors)
9. பொறிக்கலம் (Spark Chamber)

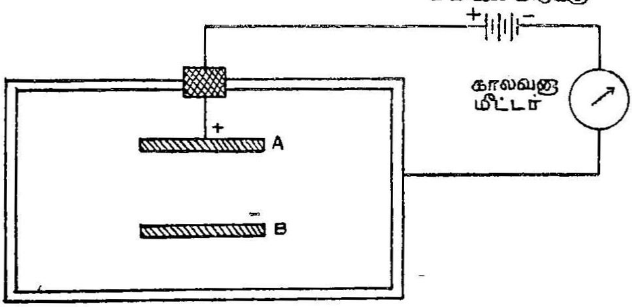
அயனிக் கலங்களும், மின்காட்டிகளும் கதிரியக்கங்களைக் கண்டறிவதற்குப் பெரும்பாலும் பயன்படுத்தப்பட்டபோதும் ஒரு தனித்த கதிர்க் கற்றையையோ அல்லது ஒரு தனித்த

துகளையோ அவற்றால் கண்டுபிடிக்க முடிவதில்லை. சில கருவிகளைக் கொண்டு தனித்த துகளைக் கண்டுபிடிக்கலாம். இதற்குக் காட்டாக மிளிர்தல் காட்டியைக் கூறலாம். பொருள்களில் அயனியாக்கத்தையே உண்டாக்காத நியூட்ரான், நியூட்ரினோ போன்ற துகள்களை வேறு முறைகள் கொண்டுதான் கண்டறிய இயலும்.

மேற்கண்ட காட்டிகளில் ஒரு சிலவற்றை இங்குக் காண்போம்.

4·2 அயனிக்கலம்

ஒரு வாயுவின் வழியாக மின்னூட்டம் பெற்ற துகள்கள் செல்கின்றபோது அதில் "அயனியாக்கம்" ஏற்பட்டு, எலக்ட்ரான்களும் நேர் மின்னூட்டம் கொண்ட அயனிகளும் உற்பத்தியாகின்றன என்பது நமக்குத் தெரிந்ததே. இந்த அயனியாக்கத்தை அளப்பதன் மூலம் இதை தோற்றுவிக்கின்ற துகள்களின் ஆற்றல்களை நாம் ஒருவாறு அறியலாம். மிகச் சாதாரணமான ஒரு "அயனிக்கலம்" (Ionisation Chamber) படம் (4·1)-ல் காட்டப்பட்டுள்ளது. இக் கலத்தில் குறைந்த அழுத்தமுள்ள ஏதாவது ஒரு வாயு அடைக்கப்பட்டுள்ளது. இதனுள் A, B என்ற இரு மின் தகடுகள் பொருத்தப்பட்டுள்ளன. இதில் A என்பது நேர் மின்னூட்டமும், B என்பது எதிர்மின்னேட்டமும் கொண்டு படத்தில் காட்டியவாறு அமைக்கப்பட்டுள்ளன. இவ்விரு மின் தகடுகளுக்கு இடையே கண்டுபிடிக்கப்பட வேண்டிய துகள்கள் செலுத்தப்பட்டால், அவை கலத்திலுள்ள வாயுவில் அயனியாக்கம் உண்டாக்கி எலக்ட்ரான்களையும், நேர் மின்னூட்டம் கொண்ட அயனிகளையும் தோற்றுவிக்கின்றன.



படம் 4·1
ஒரு (சாதாரண) (எளிய) அயனிக்கலம்

எலக்ட்ரான்கள் நேர்மின் தகட்டிலும், நேர் மின்னூட்டம் கொண்ட அயனிகள் எதிர்மின் தகட்டிலும் சேகரிக்கப்பட்டு ஓர் அயனி மின்னோட்டம் உண்டாகிறது. இந்த அயனி மின்னோட்டத்தைக் கால்வனு மீட்டர் போன்ற மின்னோட்டமானி ஒன்றின் துணைக்கொண்டு அளக்கலாம்.

ஒரு வினாடியில் அயனிக் கலத்தின் வழியாகச் செல்லும் N துகள்களில் ஒவ்வொன்றும் E மில்லியன் எலக்ட்ரான் வோல்ட்டு இழந்தால் அதனால் வெளியேறும் மின்னூட்டம் Q வை

$$Q = \frac{2\ NEC}{30} \times 10^{6} \text{ நிலைமின் அலகு/வினாடி.}$$

என்று எழுதலாம்.

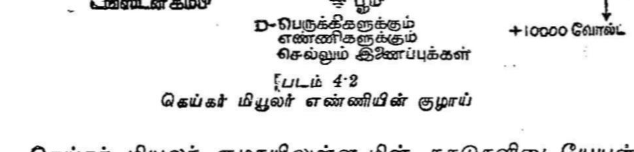
ஓர் அயனி இரட்டையின் (ion pair) மின்னோட்டம் $2e$ ஆகும். இது ஏறத்தாழ 30 எ. வோ. ஆற்றல் இழப்பிற்குச் சமமாக இருக்கும். மின்புலத்தின் வலிமை போதுமான அளவு இருந்தால், அயனியாக்கத்தில் உண்டாகும் எல்லா எலக்ட்ரான்களையும், நேர் மின்னூட்டம் கொண்ட அயனிகளையும் சேகரிக்க முடியும். இப்பொழுது மின் சுற்றில் பாய்கிற மின்னோட்டம் Q ஆம்பியர் ஆகும்.

அயனி மின்னோட்டத்தை அளப்பதற்குப் படத்தில் காட்டிய வாறு ஒரு மின்னோட்டமானியைப் பயன்படுத்தினோமானால், இது ஓர் எண்ணி (Counter) ஆக இருக்க முடியாது. மின்னோட்டமானி யால் அதி விரைவில் பாய்கிற மின்னோட்டத்தை அளக்க முடியாது. எனவே தனித்தனியான துகள்களைக் கண்டறிய இதை நாம் பயன்படுத்த முடியாது. ஆனால், மின்னோட்ட மானியின் அளவீடு, கலத்தின் வழியாகச் செல்லும் துகள் களின் எண்ணிக்கைக்கு நேர் விகிதத்தில் இருக்கும். எனவே இத்தகைய அயனிக் கலத்தைக் கொண்டு அதிக எண்ணிக்கை கொண்ட துகள் பாயங்களை (Particle fluxes) எளிதாகக் கண்டு பிடிக்கலாம். அயனிக் கலத்தின் சுவர்களில் ஃபோரான் முலாம் பூசி, நியூட்ரான் துகள் பாயங்களைக் கண்டுபிடிக்கலாம்.

4·3. கெய்கர் மியூலர் எண்ணி

கதிரியக்கமுடைய துகளோ அல்லது கதிரோ, வாயு நிரப்பப் பட்ட ஒரு குழாயின் வழியாகச் செல்லும்போது அதில் அயனி யாக்கம் உண்டாக்குகிறது. இந்த அயனியாக்கத்தின் காரண மாகக் கிடைக்கும் அயனி மின்னோட்டத்தைப் பெருக்கிகள்

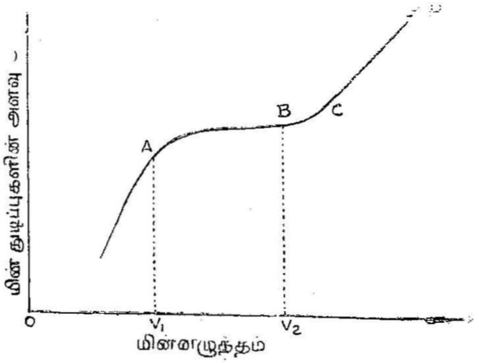
கொண்டு அதிகப்படுத்தி அவற்றின் மதிப்பைக் கண்டறிவதிலிருந்து கதிர் அல்லது துகளைக் கண்டுபிடிக்கலாம். இந்த அயனி மின்னோட்டத்தை அடிப்படையாகக் கொண்டு அமைக்கப்பட்ட எண்ணிகள் பல. அவற்றுள் கெய்கர் மியூலர் எண்ணியும் ஒன்று. இதன் அமைப்பு படம் (4·2)-ல் காட்டப்பட்டிருக்கிறது. *A* என்ற உலோகச் சிலிண்டரில் *B* என்ற டங்ஸ்டன் கம்பி ஒன்று குழாயின் அச்சுக் கோட்டில் பொருத்தப்பட்டுள்ளது. இந்த சிலிண்டரில் ஒரு சில செ. மீ. பாதராச அழுத்தம் உள்ள ஒரு வாயு நிரப்பப்பட்டுள்ளது. சிலிண்டருக்கும், டங்ஸ்டன் கம்பிக்குமிடையே ஓர் ஆயிரம் வோல்ட்டு மின்வழுத்தம் ஏற்படுத்தப்பட்டுள்ளது. கம்பி நேர் மின் புள்ளிக்கும் பூமிக்குமிடையே இணைக்கப்பட்டுள்ளது. அயனியாக்கம் உண்டாக்கவல்ல துகளோ அல்லது கதிரோ கண்ணாடி அல்லது உலோகச் சுவரை ஊடுருவிச் சென்று, குழாயிலுள்ள வாயு அணுக்களைத் தாக்கிப் பல அயனிகளை உண்டாக்குகின்றன. இந்த அயனிகள் இன்னும் பல அயனிகளை உண்டாக்கிச் சிலிண்டருக்கும், கம்பிக்குமிடையே ஒரு 'மின் துடிப்பை'த் தோற்றுவிக்கின்றன. இவ்வாறு கிடைக்கும் மின் துடிப்பினை மின் பெருக்கிகள் (amplifiers) கொண்டு மின்னழுத்தத்தையும் ஆற்றலையும் பெருக்கி அதைக் கொண்டு சிக்கலான எலக்ட்ரானிக் சுற்றுகளையும் எண்ணிகளையும் செயல்படச் செய்தோமானால், அயனியாக்கத்தைத் தோற்றுவிக்கும் கதிரின் பண்புகளையும் ஆற்றலையும் அறிய முடியும்.



படம் 4·2
கெய்கர் மியூலர் எண்ணியின் குழாய்

கெய்கர் மியூலர் குழாயிலுள்ள மின் தகடுகளிடையேயுள்ள மின்னழுத்தம் அதிகரிக்கப்படுகிறபோது, ஒரு நிலையில் அதிக அளவில் மின் துடிப்புகள் தோன்றுகின்றன. படம் (4·3)-ல் காட்டியிருப்பதுபோல் மின்னழுத்தம் V_2 அளவிற்கு வரும்வரைக் கெய்கர் குழாயில் மின்னழுத்தம் அதிகமானபோதிலும், மின் துடிப்புகளின் அளவு அநேகமாக மாறுபடுவதில்லை. கெய்கர்

குழாயின் சிறப்பியல் கோட்டில் இது 'உயர் மட்ட நிலை' (Plateau) எனக் குறிக்கப்படுகின்றது. இந்தப் பகுதியில் குழாயில் உண்டாகும் அயனிகள் எவ்வளவாக இருப்பினும் கதிர்கள் தோற்றுவிக்கும் மின் துடிப்புகளில் அதிக மாறுதல் இல்லை எனலாம். கெய்கர் குழாயின் மின்னழுத்தம் V_2-க்கும் அதிகமாக்கப்பட்டால், படத்தில் காட்டியவாறு அயனி மின்னோட்டம் மிக அதிகமாகிறது. இது படத்தில் CD என்ற பகுதியினல் காட்டப்பட்டிருக்கிறது.

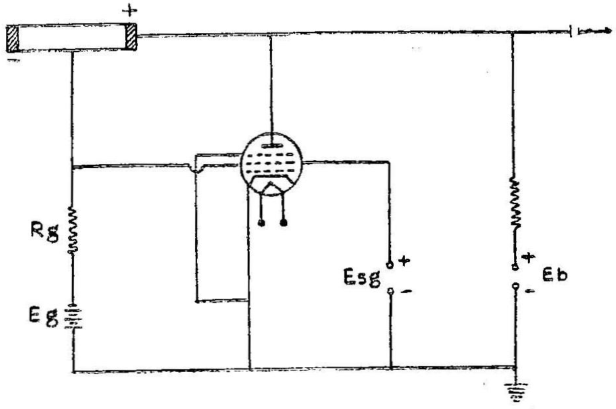


படம் 4·3
கெய்கர் எண்ணியில், மின் துடிப்புகளின் எண்ணிக்கை எவ்வாறு மின்னழுத்தத்தை யொட்டி மாறுகிறது என்பதைக் காண்பிக்கும் படம்

இப்பொழுது குழாயில் தொடர்ச்சியாக மின்னோட்டம் பாய்ந்து குழாயைக் கெடுத்துவிடுகிறது எனலாம். இத்தகைய கெடுதல் விளைவிக்கும் மின் பாய்ச்சலைக் குறைப்பதற்குச் சில முறைகள் கையாளப்படுகின்றன. இவை மின் சரிவு (Quenching) என்றழைக்கப்படுகின்றன. கெய்கர் குழாயோடு ஒரு பெரிய மின் தடையைத் தொடர் முறையில் இணைத்தோ அல்லது குழாயில் புகுத்தப்பட்டிருக்கும் வாயுவின் பண்பைத் திருத்தியோ இத்தகைய "மின் சரிவுகளை" நிகழ்த்தலாம். குழாயில் சுமார் 10% சாராயம் (ஆல்கஹால்) கலந்த ஆர்கான் வாயுவையோ அல்லது ஐசோபூடேன் என்ற கரிப்பொருள் கலந்த "ஹீலியம்" வாயுவையோ நிரப்புவதன் மூலம் வாயுவில் தானகவே மின் சரிவு ஏற்படுமாறு செய்யலாம். இம் முறை "தன் மின் சரிவு" (Self quenching) எனப்படுகிறது. மிகக் குறைந்த நேரத்தில் இந்த மின் சரிவு ஏற்படுவதற்குப் பல தனிப் பண்புகள் கொண்ட மின் சுற்றுகள் இப்பொழுது உருவாக்கப்பட்டுள்ளன. இம் முறையைக் கையாளு

வதால் கணிப்பு வீதமும் (Counting Rate) அதிகரிக்கும். இருப்பினும் நடைமுறையில் பயன்படுத்தப்படும் கெய்கர் மியூலர் குழாய்களில், மின் பாய்ச்சலைக் குறைப்பதற்கும் அயனியக்கத்தை அழிப்பதற்கும் ஏறத்தாழ 100 மைக்ரோ விநாடிகளாவது ஆகின்றன.

நெஹர்-ஹார்ப்பர் என்ற இரண்டு விஞ்ஞானிகள் 'தன்மின் சரிவு' நிகழ முடியாதபொழுது, வெளிப்புற மின் சுற்று ஒன்றின் துணை கொண்டு மின்சரிவுகளை நிகழ்த்தினர். அவர்கள் பயன் படுத்திய மின்சுற்று கீழே கொடுக்கப்பட்டுள்ளது. கெய்கர்



படம் 4·4
மின்சரிவு ஏற்படுத்த நெஹர்-ஹார்ப்பர் பயன்படுத்திய மின்சுற்று

மியுலர் குழாயின் நடுவிலுள்ள மின்கம்பி ஓர் உயர்ந்த மின்னழுத்த மின்கல அடுக்கின் நேர்மின் வாய்க்கும், வெளிக்குழாய் அதன் கிரிட்டிற்கும் இணைக்கப்பட்டிருக்கின்றது. நேர்மின்வாய்ப் பளுத்தடை $(Rp)_2$ மெகோம் அளவிற்கு உள்ளது. கிரிட் மின் தடை $(Rg)1$ முதல் 60 மெகோம் வரை உள்ளது. கிரிட் (grid) மின்னழுத்தமானது, அயனியாக்கம் தோற்றுவிக்கின்ற கதிர்கள் வருவதற்கு முன் நேர்மின்வாய் மின்னோட்டம் சுழியாக இருக்கும் அளவிற்குச் சரிசெய்யப்பட்டிருக்கிறது. நேர்மின்வாய் மின்னோட்டம் மிகக் குறைந்து இருக்கும்போது மிக அதிக நேர்மின் வாய் மின்னழுத்தம் உண்டாகிறது. அயனியாக்கும் துகள் வருகின்றபொழுது வாயுவில் அயனியாக்கம் ஏற்பட்டுக் கிரிட் எதிர் மின்னழுத்தம் குறைவதால், நேர்மின்வாய் மின்னோட்டம் ஏற்படு

கின்றது. கிரிட் மின்னழுத்த வேறுபாடு ஓரளவிற்கு இருக்கும் போது Rp-முனைகளில் ஏற்படும் மின்னழுத்தச் சரிவு காரணமாக எண்ணியின் மின்னழுத்தம் அதன் பயனின் தொடக்க மின்னழுத் தத்தைவிடக் குறைந்துவிடுகின்றது. எனவே, எண்ணியின் மின்சரிவு மறைந்து மறுமுறையும் செயல்படும்வண்ணம் எண்ணி பழைய நிலையை அடைந்துவிடுகின்றது.

கெய்கர் மியூலர் எண்ணிகள் பெரும்பாலும் γ-கதிரியக்கங் களைக் கண்டுபிடிப்பதற்குப் பயன்படா. ஆனல், அவை புரோட் டான், நியுட்ரான் போன்ற கருத் துகள்களைக் கண்டறிவதற்கும், காஸ்மிக் கதிர்களின் செறிவை அளப்பதற்கும், காஸ்மிக் கதிர் நிகழ்ச்சிகளைக் கண்டறிவதற்கும் பயன்படுத்தப்படுகின்றன.

4·4 விகித எண்ணி (Proportional Counter)

விகித எண்ணி வேலை செய்யும் முறை ஏறத்தாழ அயனிக் கலம் வேலை செய்யும் முறையை ஒத்திருக்கிறது எனலாம். விகித எண்ணியில் துகளின் ஆற்றல் மாறுபடாத வகையில் அயனியாக்கத்தினல் ஏற்படும் மின் துடிப்பு அதிகரிக்கப்படு கிறது. 'வாயு அயனியாக்கத்தின் சிறப்பியல்' கோடுகளிலிருந்து மின்னழுத்தம் ஒரு குறிப்பிட்ட அளவிற்கு மேல் அதிகரிக்காத பொழுது மின் துடிப்பின் உயரம் மாருது என்றும், அக் கோட்டின் இப் பகுதியில்தான் அயனிக்கலம் செயல்படுகிறதென்றும் பார்த் தோம். மின்னழுத்தத்தை இந்த அளவிற்கு மேல் அதிகரித்தால் இரண்டாம் நிலை அயனியாக்கம் ஏற்படுவதால் மின் துடிப்பின் உயரம் செயல்படும் மின்னழுத்தத்திற்கு நேர் விகிதத்தில் அமை கின்றது. இந்தப் பகுதியில்தான் விகித எண்ணி செயல் படுகிறது.

விகித எண்ணியில் வாயு நிரப்பப்பட்ட உருளை வடிவம் உள்ள குழாயின் நடுவில் ஒரு மெல்லிய கம்பி பொருத்தப்பட் டிருக்கிறது, வெளி உருளைக் குழாய் எதிர் மின்வாய் ஆகவும் நடுக் கம்பி நேர் மின்வாய் ஆகவும் செயல்படுகின்றன. நடுவில் உள்ள கம்பி மிக மெல்லியதாக இருப்பதாலும் செயல்படும் மின்னழுத்தம் மிக அதிகமாக இருப்பதாலும் நடுவிலிருந்து 'r' தொலைவில் செயல்படும் மின்புலம் $E = -\frac{dv}{dr}$ மிக அதிகமாக உள் ளது. கம்பியின் ஆரம் 'a' ஆகவும், உருளையின் ஆரம் 'b' ஆகவும் இருந்தால் மையத்திலிருந்து r தொலைவில் செயல்படும் ஆர மின் புலம் (Radial field)

$$E = \frac{V}{r \log_e \left(\frac{b}{a}\right)} \text{வோல்டு/செ.மீ.}$$

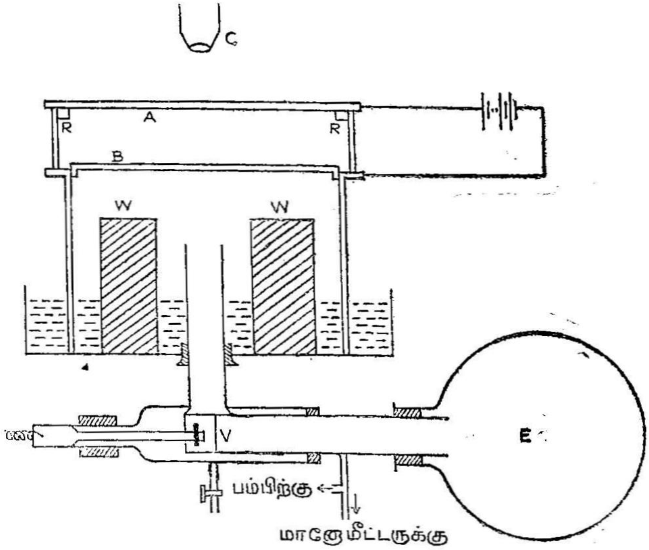
என்ற சமன்பாட்டால் கொடுக்கப்படுகின்றது. இதில் V என்பது வெளி உருளையைப் பொறுத்து நடுக் கம்பியின் நேர் மின்னழுத்த மாகும்.

விகித எண்ணி, α துகள், நியூட்ரான் எண்ணிக்கைகளுக்குப் பெரும்பாலும் பயன்படுத்தப்படுகின்றது. குறைந்த ஆற்றல் படைத்த γ கதிர்களைக் கண்டறிவதற்கும் விகித எண்ணிகள் பெருமளவில் பயன்படுத்தப்படுகின்றன.

4·5 வில்சனின் மேகக் கலம்

இந்த ஆய் கருவி 1907ஆம் ஆண்டு C. T. R. வில்சன் என்ற ஆங்கிலேய விஞ்ஞானி ஒருவரால் கண்டுபிடிக்கப்பட்டது. இதிலுள்ள கலத்தில் தெவிட்டிய நீராவி கலந்த காற்றோ அல்லது வாயுவோ வைக்கப்பட்டுள்ளது. கதிரியக்கப் பொருள் கலத்தினுள் செல்லும்போது, அதிலுள்ள வாயுவின் அழுத்தம் திடீரெனக் குறைக்கப்படுகிறது. இவ்வாறு வாயுவானது வெப்பம் மாற்றீடற்ற பெருக்கம் (Adiabatic Expansion) அடைகின்ற பொழுது, நீராவி குளிர்விக்கப்பட்டு, வாயுவோடு சேர்ந்திருக்கும் தூசித் துகள் மேலும், வாயு அயனிகளின் மேலும் நீர்த் துளியாக மாறுகிறது. எனவே, கதிரியக்கத் துகள்கள் செல்கின்ற பாதைகள் எல்லாம் நீர்த் துளிகள் உண்டாகி ஒரு சுவடு கிடைக்கின்றது. இத் துகளின்மீது செறிந்த ஒளியை விழச் செய்து, புகைப்படக் காமிராவின் உதவி கொண்டு இச் சுவடுகளைப் புகைப் படம் எடுக்கலாம். வில்சனின் மேகக்கலம் படம் (4·5)-ல் காட்டப் பட்டுள்ளது. A என்பது ஒரு கண்ணடித் தகடு. B என்பது கீழிருந்து மேலே செல்லுமாறு அமைக்கப்பட்டுள்ள ஓர் இயங்கும் தகடு. இவ் விரு தகடுகளுக்கிடையேயுள்ள இடைவெளியில் தூசி துப்புரவாக அகற்றப்பட்ட நீராவி செறிந்த ஒரு வாயு புகுத்தப் பட்டுள்ளது. W W என்பவை காற்று இடைவெளியைக் குறைப்பதற்காக அமைக்கப்பட்டுள்ள இரண்டு மரக்கட்டைகள். B-க்குக் கீழ் வெற்றிடமாக்கப்பட்ட E என்ற மற்றொரு கலம் பொருத்தப் பட்டிருக்கிறது. இதில் V என்ற ஒரு வால்வு படத்தில் காட்டியவாறு கம்பிச் சுருளொன்றோடு பொருத்தப்பட்டுள்ளது. இந்தக் கம்பிச் சுருளின் உதவியால் வால்வை உள்ளிழுக்கவோ அல்லது வெளியகற்றவோ முடியும். வால்வு V திறக்கும் போது C தகடானது திடீரெனக் கீழே இறங்குகிறது. இதனால் B-க்கு மேற்

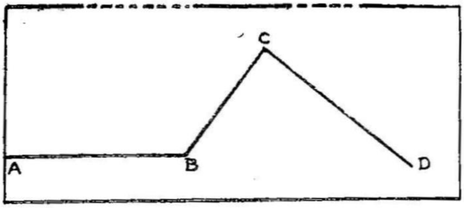
புறத்தில் உள்ள காற்று திடீரெனப் பெருக்கமடைய முடிகிறது. *B* தகட்டிற்கும் *A* தகட்டின் மேற்புறத்திற்கும் இடையே ஒரு மின் புலம் செயல்படுகிறது. கதிரியக்கத் துகள்கள் உள்ளே செல்லும் போது இத்தகைய வெப்ப மாற்றீடற்ற பெருக்கம் ஏற்பட்டால், எங்கெல்லாம் துகள்கள் செல்கின்றனவோ அங்கெல்லாம் நீர்த்



படம் 4·5
வில்சனின் மேகக் கலம்

துளிகள் உண்டாகி, ஒரு பாதை உருவாகின்றது. இப் பாதையை உடனடியாகப் புகைப்படக் காமிராவின் உதவிகொண்டு படமெடுத்துவிடலாம். புகைப்படம் எடுத்தவுடன் மின்புலத்தைச் செயல்படச் செய்தால், அயனியாக்கமெல்லாம் முற்றிலும் அழிந்து, காற்று மறுபடியும் பழைய நிலையை அடைந்துவிடுகிறது.

தற்போது பயன்படுத்தப்படும் மேகக் கலங்களிலெல்லாம், கண்டுபிடிக்கப்பட வேண்டிய துகளே காற்றுப் பெருக்கத்தை ஏற்படுத்தவும், உடனே காணப்படும் நீர்த்துளியைப் புகைப்படமெடுக்கவும் செய்கிறது. மேகக்கலத்தைக் கொண்டு எடுத்த α-துகள் ஒன்றின் பாதையின் படம் (4·6)-ல் காட்டப்பட்டுள்ளது.



படம் 4·6.
α-துகளொன்றின் பாதையைக் காட்டும் படம்

மேற்கண்ட ABCD என்ற α-துகளின் பாதையில் AB, BC, CD என்பன நேர்கோட்டுப் பாதைகள். B, C என்ற புள்ளிகளில் α-துகள் அதிக நிறை கொண்ட அணுக்கருக்களோடு மோதுகின்றன. வெவ்வேறு துகள்கள் மேகக்கலத்தின் வழியாகச் செல்லும் போது வெவ்வேறு வகைப் பாதைகளில் செல்வதால், பாதைகளைக் கூர்ந்து கவனிப்பதிலிருந்து அப் பாதைகளை உண்டாக்கிய துகள்களின் நிறை, வேகம் முதலியவற்றைக் கணக்கிடலாம். எலக்ட்ரான்கள் நீண்ட, மெல்லிய பாதைகளை உண்டாக்குகின்றன. ஆனால், α-துகள் போன்றவை தடித்த குறுகிய பாதைகளை உண்டாக்குகின்றன.

மேகக் கலத்தின் துணைகொண்டு அணுக்கரு, துகள்கள் ஆகியவற்றிடையே நிகழும் செயலீடுகளைப்பற்றி அறியலாம். மோதலுக்கு முன்னும், பின்னும் உள்ள பாதைகளை மேகக் கலத்தைக் கொண்டு அறியமுடியுமாதலால், அவற்றினின்று துகள் சிதறல் கோணம், ஆற்றல் முதலியவற்றைத் துல்லியமாகக் கணிக்கலாம்.

4·6 குமிழ்க்கலம் (Bubble Chamber)

இது 1952 ஆம் ஆண்டு கிளேசர் (D. A. Glasser) என்ற விஞ்ஞானியால் கண்டுபிடிக்கப்பட்டது. இது செயல்படும் தத்துவம் ஏறத்தாழ மேகக்கலம் செயல்படும் தத்துவத்திற்கு எதிராக உள்ளது எனலாம். நீராவி கலந்த காற்றில் நீர்த்துளிகள் உற்பத்தியாவதற்குப் பதிலாகக் குமிழ்க்கலத்தில் ஆவியின் குமிழ்கள் திரவத்தில் உண்டாகின்றன. மேகக் கலத்தில் வைக்கப்பட்டிருக்கும் நிறை செறிவுடைய காற்றிற்குப் பதிலாகக் குமிழ்க்கலத்தில் மீச் சூடேற்றப்பட்ட (super heated) திரவம் ஒன்று வைக்கப்பட்டிருக்கிறது. முதன் முதலில் திரவப் ப்ரோபேன் (propane), திரவ ஹைட்ரஜன் முதலிய திரவங்கள்

குமிழ்க்கலத்தில் வைக்கப்பட்டிருந்தன. திரவமானது அதன் கொதிநிலைக்கு ஒரு சிறிதளவு அதிக வெப்ப நிலைக்குச் சூடேற்றப் படுகிறது. இதை, திரவத்தின் மேல் சாதாரணமாகச் செயல்படும் அழுத்தத்தைச் சற்று அதிகமாக்குவதால் பெறலாம். இந்த வகையில் திரவம் அதிகச் சூடடைந்த நிலையில் இருக்கும்போது அதன் வழியாக ஏதாவது துகள் செல்லுமானல் அதை மைய மாக வைத்துக் குமிழ்கள் உண்டாக ஆரம்பிக்கின்றன. எனவே, எவ்வாறு மேகக்கலத்தில், கதிரியக்கத் துகள்கள் அயனியாக் கத்தின் மூலம் ஒரு நீர்த்துளிப் பாதையை ஏற்படுத்துகின்றதோ, அவ்வாறே குமிழ்க்கலத்தில் செல்லும் துகள்கள் அயனியாக் கத்தின் மூலம் ஒரு 'குமிழ்ப்பாதை'யை உண்டாக்குகின்றன. இக் குமிழ்ப்பாதைகளை அவை ஏற்பட்டவுடனே காமிராவின் உதவி கொண்டு புகைப்படமெடுத்துவிடலாம். இப் புகைப் படங்களைக் கூர்ந்து ஆராய்வதன் மூலம் கதிரியக்கத் துகள்களின் மின்னூட்டம், ஆற்றல் முதலியவற்றைக் கணிக்கலாம்.

சிற்சில சமயங்களில் கதிரியக்கமுடைய துகளொன்று மேகக் கலத்தின் ஊடே செல்லும்போது, எந்தக் கருவோடும் மோதாமல் சென்றுவிடக் கூடும். எனவே, இத் துகள் ஏற்படுத்தும் பாதை முற்றுப் பெறாத பாதையாக இருப்பதால், அதன் தன்மைகளை நாம் முற்றிலும் அறிய முடிவதில்லை. ஆனல், அதே துகள் குமிழ்க் கலத்தின் வழியாகச் செல்லும்போது ஒரு சில செ. மீ. தொலை வில் தன் ஆற்றலை முற்றிலும் இழந்து துகள் நின்றுவிடக் கூடு மாதலால், மேகக்கலத்தைவிடக் குமிழ்க்கலம் சிறிய அளவுடைய தாக இருக்கும். இது குமிழ்க்கலத்தின் சிறப்பு அம்சங்களில் ஒன்று என்று கூறுவது மிகையாகாது.

4·7 புகைப்படக் கூழ்கள்:

(அ) முன்னுரை

கதிரியக்கம் புகைப்படத் தகடுகளைக் கருமையாக்கியதே அதனைப் பெக்யூரல் கண்டுபிடிப்பதற்குக் காரணமாக இருந்தது என முன்பே நாம் பார்த்தோம். மின்னூட்டம் பெற்ற துகள்கள் புகைப்படத் தகட்டிலுள்ள கூழின் வழியாகச் செல்லும்போது அதிலுள்ள மிகச் சிறிய வெள்ளி புரோமைடு படிகங்களோடு செயலீடுகள் நிகழ்த்தி அவை செல்லும் வழியில் உள்ளுறைப் பிம்பங்களைத் தோற்றுவிக்கின்றன. நியபெக் டெ செயின்ட் விக்டர் என்ற விஞ்ஞானி 1876ஆம் ஆண்டு யுரேனியம் உப்புகள் புகைப்படத் தகடுகளைக் கருமையாக்குவதைக் கண்டுபிடித்திருந்

தார். இது யுரேனியம் உப்புகளில் ஏற்படும் 'ஒளி மிளிர்வின்' காரணமாக இருக்கலாம் என்று அவர் நினைத்திருந்தார்.

1911ஆம் ஆண்டில் ரெனிங்கானம் என்ற விஞ்ஞானி முதன் முதலாக α-துகளானது புகைப்படக்கூழ் வழியாகச் செல்லும் போது, தனித்தனியான பாதைகளைத் தோற்றுவிக்கின்றன என்று கண்டுபிடித்தார். தொடர்ந்து கினோஷிடா என்ற ஜப்பானிய விஞ்ஞானி α-துகளானது புகைப்படக் கூழ் வழியே செல்லும்போது அதிலுள்ள வெள்ளி ஹாலைடு பொட்டுகள் செயலீடு நிகழ்த்துவதால் புகைப்படத் தகட்டைப் பக்குவமாக்கு கிறது எனக் கண்டார்.

இதன்பின் புகைப்படத் தகட்டின் தன்மைகளைப்பற்றி பல உண்மைகள் கண்டுபிடிக்கப்பட்டபோதிலும், 1945ஆம் ஆண்டு வரை, இத் தகடுகள் கதிரியக்கங்களைக் கண்டுபிடிப்பதற்குப் பயன் படுத்தப்படவில்லை எனலாம். எனினும், 1937ஆம் ஆண்டு மிஸ் பிளவ் (Blau), வாம்பாச்சர் என்பவர்கள் காஸ்மிக் கதிர்கள் புகைப்படத் தகட்டிலுள்ள அணுக்கருக்களோடு மோதல்கள் நிகழ்த்தி அவற்றில் விண்மீன் போன்ற பிம்பங்களை உண்டாக்கு கின்றன என்று சோதனை மூலம் கண்டறிந்தார். இறுதியாகப் பிரிஸ்டல் குழு என்றழைக்கப்படும் பவல் (Powell) என்ற விஞ் ஞானியின் தலைமையில் செயல்பட்ட விஞ்ஞானிகளின் குழுதான் கதிரியக்கங்களைக் கண்டறிய முறையாகப் புகைப்படக் கூழ் களைப் பயன்படுத்தினர் எனலாம். 'கோடாக்', 'இல்ஃபோர்டு' என்ற இரண்டு வர்த்தகக் குழுக்கள் ஆராய்ச்சிகள் பல நிகழ்த்தி இப்பொழுது பயன்படுத்தப்படும் புகைப்படக் கூழ்களை முதன் முதலாக அதிக அளவில் தயாரித்தனர்.

மின்னூட்டம் கொண்ட ஒரு துகள், ஒரு கண்ணாடித் தகட்டின் மீது பூசப்பட்டிருக்கும் புகைப்படக் கூழ் வழியாகச் செல்லும் போது அவை செல்லும் பாதையில் உள்ளுறை பிம்பங்களைத் தோற்றுவிக்கின்றன. இப்பொழுது புகைப்படத் தகடுகளைக் கழுவினால் பாதைகளில் வெள்ளிப் பொடிகள் கிடைக்கின்றன. இவ்வாறு பதன் செய்யப்பட்ட தகடுகளைப் பகுதிறன் அதிகம் கொண்ட நுண்ணோக்கிகளைக் கொண்டு கண்ணுறலாம். பாதை களின் நீளம், அவற்றிலுள்ள பொடிகளின் எண்ணிக்கை, இரண் டாம் நிலைப் பாதைகள் இவற்றைக் கண்ணுற்று உள்வரும் கதிரி யக்கத் துகளின் நிறை மின்னூட்டம், ஆற்றல் முதலியவற்றைக் கணிக்கலாம்.

(ஆ) புகைப்படக் கூழ் முறையின் மேம்பாடுகள்

1. கண்ணுறும் அளவுக்குச் சீரான பாதைகள் புகைப்படக் கூழ்களில் கிடைக்கின்றன. வெவ்வேறு அயனியாக்குத் திறன் கொண்ட துகள்களுக்கு வெவ்வேறு பாதைகள் கிடைக்கின்றன.

2. இவை அணுக்கருச் செயலீடுகளில் நிகழும் மொத்த நிகழ்ச்சியை அப்படியே படமாக்கும் திறன் பெற்றவை.

3. இது இலேசாகவும் மலிவாகவும் உள்ளதால் அதிகக் குத்துயரத்தில் நிகழும் காஸ்மிக் கதிர் நிகழ்ச்சிகளை அறிவதற்குப் பெரும்பாலும் பயன்படுத்தப்படுகின்றன.

4. இது அதிகத் தடுக்கும் திறன் கொண்டதாகையால், மிகக் குறைந்த வாழ்வுக்காலம் கொண்ட அனேகத் துகள்களை இதைக் கொண்டு கண்டுபிடிக்கலாம்.

(இ) புகைப்படக் கூழ் முறையின் குறைபாடுகள்.

1. புகைப்படத் தகட்டைக் கண்ணுறுவதற்கும், அதில் தோற்றுவிக்கப்படும் பாதைகளின் அளவுகளை எடுப்பதற்குமிடையில் அதிக நேரம் கடந்துவிடுகிறது.

2. புகைப் படக் கூழில் துகள் ஏற்படுத்தும் பாதையின் நீளம் மேகக்கலத்தில் கிடைக்கும் பாதையின் நீளத்தைவிட மிகக் குறைந்து இருப்பதால், காந்தப் புலத்தைக் கொண்டு இப் பாதைகளின் வளைவுகளை அளக்கமுடியாது.

3. மிகக் குறைந்த அளவில் அயனியாக்கம் உண்டாக்கும் எலக்ட்ரான்கள் போன்ற துகள்களைப் புகைப்படக் கூழ்களைக் கொண்டு காண முடியாது. ஆனல், தற்போது கோடாக் இல்ஃபோர்டு வர்த்தகக் குழுக்கள் எலக்ட்ரான்களையும் காண்பதற்கேற்ற புகைப்படக் கூழ்களைத் தயாரிக்கின்றனர்.

(ஈ) புகைப்படக் கூழ் முறையைக் கொண்டு நிகழ்த்தப்பட்ட பல்வேறு கண்டுபிடிப்புகள்.

1. அமைதிநிலை நிறை $273m_e$ கொண்ட "பையான்" (Pion) இம் முறையில்தான் முதலில் கண்டுபிடிக்கப்பட்டது.

2. K மீசான்களும் இம் முறையில்தான் கண்டு பிடிக்கப்பட்டன.

3. ஆன்டிலாம்டா ஹைபெரனும் ($\overline{\Lambda}^\circ$ புகைப்படக் கூழ் முறையினல்தான் கண்டுபிடிக்கப்பட்டது.

4·8 மின்மினிப்பு எண்ணிகள்

கதிரியக்க நிகழ்ச்சிகளில் சில மிகக் குறுகிய காலத்தில் நிகழ்வதால் அவற்றை நாம் முன்பு கண்ட அளவிகளால் எண்ண முடிவதில்லை. அதாவது, இவற்றின் எண்ணிக்கையைக் கண்டு பிடிக்க மிகக் குறைந்த பகுப்பு நேரம் உடைய எண்ணிகள் தேவைப்படுகின்றன. எனவே, மிகக் குறைந்த பகுப்பு நேரம் உடைய மின்மினிப்பு எண்ணிகள் இப்பொழுது நிறுவப் பட்டுள்ளன.

கதிரியக்கமானது மின்மினிப்பு உண்டாக்கும் படிகம் ஒன்றின்மேல் படும்போது ஒரு மின் காந்த அலை உமிழப்படு கிறது. இந்த மின் காந்த அலை கண்ணுறும் ஒளியின் நிரலில் இருக்கவேண்டியதில்லை. இவ்வாறு உமிழப்பட்ட மின்காந்த அலைகள் ஒளி மின் பெருக்கிகளின் வழியாகச் செலுத்தப்பட்டு, அதிக அளவிற்குப் பெருக்கமடைந்து, எண்ணும் பொறிகளுக்குச் செல்கின்றன. சிறிய அளவு செறிவுடைய கதிரியக்கமும் இச் சாதனத்தினால் அளவிடும் அளவிற்கு மின் காந்த அலைகளாக மாற்றப்பட்டு, ஒளி மின் பெருக்கிகளால் பெருக்கமடைந்து கணிசமான அளவிற்கு எண்ணிக்கையைப் பெறுகிறது.

4·9 நியூட்ரான்களை எண்ணுதல்

நியூட்ரான்கள் மின்னூட்டமற்ற துகள்களாகையால் தாம் செல்லும் வாயுக்களில் அயனியாக்கத்தைத் தோற்றுவிக்க முடியாதவை. எனவே, மேகக் கலம், கெய்கர் குழாய் போன்ற கருவிகளைப் பயன்படுத்தி அவற்றைக் கண்டறிய முடியாது. ஆனால், நியூட்ரான்கள் சில அணுக்கருக்களோடு செயலீடுகள் நிகழ்த்தி α துகள் புரோட்டான் போன்ற துகள்களை வெளிவிடக் கூடும். இந்த இரண்டாம் நிலைத் துகள்களைக் கண்டறிவதன் மூலம் நியூட்ரான்களைக் கண்டறிய இயலும். காட்டாகப் போரான் நியூட்ரான்களால் தாக்கப்படும்போது α துகள்களை வெளிவிடு கின்றன. வெளிவரும் α துகள்களில் அளவீடுகள் நிகழ்த்தி அவற்றிலிருந்து நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கையையும், பண்பு களையும் அறியலாம்.

வினாக்கள்

1. பின்வரும் காட்டிகள் வேலை செய்யும்போது நிகழும் இயற்பியல் விளைவுகளைப் பற்றி குறிப்புகள் வரைக.

(அ) அயனிக்கலம்

(ஆ) புகைப்படக் கூழ் முறைகள்

(இ) மேகக்கலம்

(ஈ) குமிழ்க்கலம்

2. கெய்கர் மியூலர் எண்ணி ஒன்றின் படம் வரைந்து அது வேலை செய்யும் முறையை விளக்கு. அது எவ் வழியின் 'விகித எண்ணி'யினின்றும் வேறுபட்டிருக்கிறது ?

3. வில்சனின் மேகக் கலம் ஒன்றின் படம் வரைந்து அதன் பாகங்களைக் குறி. அது வேலை செய்யும் தத்துவத்தைக் குமிழ்க் கலத்துடன் ஒப்பிடுக. எவ் வழிகளில் குமிழ்க்கலம் மேகக் கலத்தைவிடச் சிறந்தது ?

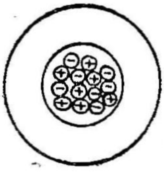
4. புகைப்படக் கூழ் முறையினை விளக்கி, அதனைப் பயன் படுத்தி நிகழ்த்தப்பட்ட இரண்டு கண்டுபிடிப்புகளைத் தருக.

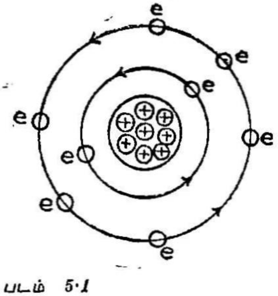
5. அதிக ஆற்றல் படைத்த துகள்களைக் கண்டுபிடிக்கும் சாதனங்களை விவரித்து அவற்றிற்கிடையேயுள்ள அதன் ஒப்புமைக் குணங்களைத் தருக.

5. அணுக்கருப் பண்புகள்

5·1 முன்னுரை

உலகில் நாம் சாதாரணமாகக் காணும் பொருள்கள் எல்லாம் மின்னூட்டம் அற்றவையாக உள்ளன. அதாவது எல்லாப் பொருள்களின் அணுக்களும் மின்னூட்டமில்லாமலே இருக்கின்றன. ஆனால் 'வெப்ப அயனி உமிழ்வு' (Thermionic Emission) ஒளி மின் உமிழ்வு (Photo Electric Emission) ஆகியவை பொருள்களிலிருந்து எதிர் மின்னூட்டத்தைக் கொண்ட எலக்ட்ரான்களை வெளிப்படுத்துகின்றன. எனவே, அணுக்களின் உள்ளமைப்பில் எதிர் மின்னூட்டமுடைய எலக்ட்ரான்களும் அதற்குச் சமமான நேர்மின்னூட்டமுடைய மற்றொரு பகுதியும் இருக்கவேண்டும் என்பதும் புலனாகின்றது. அணுவில் நேர் மின்னூட்டமும், அதற்குச் சமமான எதிர் மின்னூட்டமும் எவ்வாறு அமைந்துள்ளன என்பதை J. J. தாம்சன், ருதர்போர்டு நீல்ஸ்போர் போன்ற பல விஞ்ஞானிகள் கண்டறிந்தனர் 1908ஆம் ஆண்டில் J. J. தாம்சன் அணுவின் அமைப்பிற்கு ஒரு தற்கோள் கொடுத்தார். இதன்படி நேர் மின்னூட்டம் கொண்ட ஒரு கோளத்தில் எதிர் மின்னூட்டம் கொண்ட எலக்ட்ரான்கள் ஒரு சீரான முறையில் பொதிந்து கிடக்கின்றன என்று அவர் நினைத்தார்.





படம் 5·1

(அ) தாம்சனின் அணு மாதிரி அமைப்பு

(ஆ) ருதர்போர்டின் அணு மாதிரி அமைப்பு

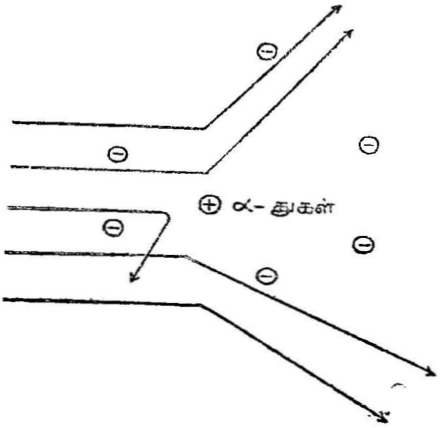
இத்தகைய ஓர் அணு மாதிரியமைப்பைக் கொண்டு ஹைடிரஜன் நிறமாலையை அவர் விளக்க முனைந்தபொழுது பல சிக்கல்கள் இருப்பதைக் கண்டார். ஆனால், 1911ஆம் ஆண்டு ரூதர்போர்டு, கெய்கர், மார்ஸ்டன் என்ற விஞ்ஞானிகள் நிகழ்த்திய ‘α துகள்’ சிதறல் சோதனைகள் மூலம் அணுவின் மத்தியில் ஒரு நேர்மின்னூட்டமுடைய அணுக்கரு இருக்கவேண்டுமென்பதும், அவற்றைச் சுற்றி எதிர் மின்னூட்டமுடைய எலக்ட்ரான்கள் வட்டப் பாதைகளில் சுழன்று கொண்டிருக்க வேண்டுமென்பதும் தெரியவந்தன. அணுவின் மையத்தில் அமைந்திருக்கும் கருவோடு வட்டப் பாதைகளில் சுற்றிக்கொண்டிருக்கும் எலக்ட்ரான்கள் நிலை மின் விசையில் பிணைக்கப்பட்டிருக்கின்றன. இந்த எலக்ட்ரான்கள் ஒரு வட்டப் பாதையிலிருந்து மற்றொரு வட்டப் பாதைக்குத் தாவுகின்றபொழுது ‘கதிர் வீச்சு உமிழ்வும் (Radiation Emission) ‘கதிர் உட்கவர்ச்சியும்’ (Absorbtion of Radiation) ஏற்படுகின்றன.

கரு, எலக்ட்ரான்களைவிடப் பன்மடங்கு நிறையுடையது. அணுவின் நிறையெல்லாம் கருவின் நிறையே என்று கூறினால் மிகையாகாது. அது மற்ற அணுக்களிடமிருந்து எலக்ட்ரான் முகில்களால் சூழப்பட்டிருப்பதால் சுலபமாக வேதியல் மாறுதலோ அல்லது இயற்பியல் மாறுதலோ அடைவதில்லை. கருக்களெல்லாம் ஏறத்தாழக் கோள வடிவம்கொண்டுள்ளன. (இதற்குச் சில விதி விலக்குகள் உள்ளன. அவற்றைப் பின்னர்க் காண்போம்.) அவற்றின் ஆரம் ஏறத்தாழ 10^{-12} செ. மீ. ஆக இருக்கிறது. அதாவது அணுவைவிட அணுக்கரு சுமார் 10,000 மடங்கு சிறியதாக உள்ளது. எவ்வாறு திரவங்களெல்லாம் ஏறத்தாழ ஒரே அடர்த்தி (1 கி. / கன செ. மீ.) உடையனவாக இருக்கின்றனவோ அவ்வாறு அணுக்களெல்லாம் ஏறத்தாழ ஒரே அளவு அடர்த்தி உடையனவாக உள்ளன. [தெவிட்டிய அடர்த்தி (Saturated Density) 10^{14} கி./கன செ. மீ.] எல்லா அணுக் கருக்களுக்கும் குறிப்பிட்ட சில பண்புகள் உள்ளன. இப் பண்புகளில் பலவற்றை நாம் சோதனைகள் மூலம் அறியலாம்.

5·2 கருவின் மின்னூட்டம்

அணுக்கரு நேர் மின்னூட்டம் கொண்டது என முதன் முதலாக 1914ஆம் ஆண்டு கண்டுபிடிக்கப்பட்டது. இயற்கைக் கதிரியக்கத்தில் பொலோனியம் போன்ற பொருள்களிலிருந்து உமிழப்படும் α துகள்களைக் கொண்டு இலேசான உலோகத்

தகடுகளைத் தாக்கியபொழுது, அவற்றில் ஒரு சில துகள்கள் தங்கள் பாதைகளினின்றும் விலக்கம் அடைந்தன. மற்றும் சில துகள்கள் வெவ்வேறு திசைகளில் சிதறின. இவ் விலக்கமும் சிதறலும், நேர் மின்னூட்டம் கொண்ட α துகளுக்கும் சிதறச் செய்கிற (Scatterer) பொருள்களிலுள்ள அணுவின் நேர் மின்னூட்டத்திற்குமிடையே செயல்படும் கூலும் விலக்கு விசையினைக் காரணமாகக் கொண்டு, α துகளின் சிதறலை நன்கு ஆராய்ந்தனர். α துகள்களில் பெரும்பாலானவை விலக்கத்தைக் கொண்டோ அல்லது விலக்கமில்லாமலோ பொருள்களினூடே சென்றபொழுது, ஒரு சில துகள்கள் மட்டும் அதிக விலக்கம் அடைவதைக் கண்டனர். ஏறத்தாழ 8,000 துகள்களில் ஒன்று 90 பாகைக்கும் மேலான விலக்கம் கொண்டிருந்ததைக் கண்டு பிடித்தனர். இது படம் 5·2-ல் காட்டப்பட்டிருக்கிறது.



படம்- 5·2.
அணுக்கருவின் அருகாமையில் நிகழும் α-துகள் சிதறல்

ரூதர்போர்டு சோதனைகளிலிருந்து α-துகள் எலக்ட்ரானைப் போன்று இரு மடங்கு நேர்மின்னூட்டத்தை உடையது என்றும், ஹைடிரஜனைப் போன்று நான்கு மடங்கு நிறை கொண்டது என்றும் தெரியவந்தது. எனவே, ரூதர்போர்டு அணுவில் இருக்கும் நேர் மின்னூட்டத்திற்கும், α-துகளிற்கும் இடையே செயல்படும் கூலும் விலக்கு விசையே மேற்கண்ட விலக்கங்களைக் கொடுக்கின்றன என்று கொண்டார். மேலும், அதிக கோண அளவு விலக்கம் ஏற்படுவதற்கு அந்த அளவின் பகுதி அதிக அளவு நேர்மின்னூட்டத்தைக் கொண்டிருக்க வேண்டுமென்றும்

நினைத்தார். இப் பகுதி பிறகு அணுக்கரு (Nucleus) என்றழைக்கப்பட்டது. மொத்தத்தில் அணு மின்னூட்டமற்று இருப்பதால் அதில் உள்ள எலக்ட்ரான்களின் நிகர எதிர் மின்னூட்டம் இக் கருவின் நேர் மின்னூட்டத்திற்குச் சமமாக இருக்க வேண்டுமென்பதும் புலனாகின்றது. அணுவில் z எலக்ட்ரான்கள் இருந்தால் அவற்றின் நிகர மின்னூட்டம் $-ze$ அலகுகள் ஆகும். இங்கு e என்பது ஓர் எலக்ட்ரானின் எதிர் மின்னூட்டத்தைக் குறிக்கும். ($e = 4{\cdot}77 \times 10^{-10}$ நிலைமின் அலகுகள்). எனவே அணுக்கரு $+ze$ மின்னூட்டம் கொண்டதென்று அறியலாம். இங்கு z என்பது 'அணு எண்' என்று அழைக்கப்படுகிறது.

5·3 கருவின் பரிமாணம்.

கருக்களுக்கு, அணுக்களைப் போலல்லாது ஒரு பரிமாணம் இருத்தல் வேண்டும். 'α-கதிர்களின் சிதறல்' சோதனை மூலம் ருதர் போர்டு கருக்களின் அளவு ஒரு குறிப்பிட்ட அளவுக்குக் கீழேதான் இருக்க வேண்டும் என்று நினைத்தார். ஏறத்தாழ எல்லாக் கருக்களும் ஒரு மேற்பரப்பைக் கொண்டிருத்தல் வேண்டும் என்று கருதவும் பல காரணங்கள் உள்ளன. அணுக்களுக்கு மேற்பரப்பு ஒன்றை நாம் வரையறுத்துக் கூறமுடியாது. ஏனெனில், வட்டப் பாதைகளில் இயங்கிக்கொண்டிருக்கின்ற எலக்ட்ரான்களுக்கும் கருவிற்கும் இடையில் அதிக இடைவெளி உள்ளது. இதன் காரணமாக அணுவின் மேற்பரப்பை நாம் சரியாக உறுதிப்படுத்த முடியாது. ஆனல், அணுக்கருக்களுக்கு ஒரு மேற்பரப்பை வரையறுக்க இயலும். ஏனெனில், கருவில் உள்ள துகள்களெல்லாம் ஒரு குறிப்பிட்ட பரப்பிற்கு உள்ளடங்கியே இருக்கின்றன. இப் பரப்பிற்கு உள்ளே அடர்த்தி சுழியாக இல்லாமலும், அதற்கு வெளியே சுழியாகவும் இருப்பதால் இப் பரப்பைக் கருவின் மேற்பரப்பு (Surface area of the nucleus) எனக் கொள்ளலாம்.

கருக்களெல்லாம் கோள வடிவமுடையவை எனக் கொண்டால், அவை குறிப்பிட்ட ஆரம் கொண்டிருக்க வேண்டுமென்று கருதலாம். இதனைக் கருவின் ஆரம் என அழைக்கின்றனர். (Radius). அணுக்கரு ஆரத்தை மிகத் துல்லியமாக அளக்க முடியாது எனினும் ஒரு கருவோடு மற்றொன்றை ஒப்பிட்டுப் பார்க்கும் அளவிற்கேனும் அதைப் பயன்படுத்தலாம்.

அணுக்கருக்களின் ஆரத்தைக் கண்டுபிடிக்கப் பல முறைகள் உள்ளன. அவற்றில் சில கருவில் மின்னூட்டம் எவ்வாறு பரவியிருக்கிறது என்பதையொட்டி இருக்கின்றன. இம் முறைகளி

லிருந்து 'கருவின் மின்காந்த ஆரத்தைப்' (Electro magnetic radius) பெறலாம். மற்றும் சில முறைகளில் கருவில் பொருள் (matter) எவ்வாறு பரவியிருக்கிறது என்பதை ஒட்டி இருக்கின்றன. இம் முறைகளிலிருந்து பெறப்படும் ஆரம் மின்காந்த ஆரத்தைவிடச் சிறிதளவு குறைந்தே இருக்கிறது.

கருவின் கனபரிமாணம் (v) அதில் அடங்கியுள்ள துகள்களின் எண்ணிக்கைக்கு நேர் விகிதத்திலிருக்கும். துகள்களின் எண்ணிக்கையை அதன் அணு நிறை எண் கொடுக்கிறது. எனவே

$$V \propto A$$

அணுவின் ஆரத்தை r என்று கொண்டால், $V = \frac{4}{3}\pi r^3$.

எனவே $\frac{4}{3}\pi r^3 \propto A$ அல்லது

$r^3 \propto A$. அதாவது $r \propto A^{\frac{1}{3}}$

அதாவது $$\boxed{r = r_0 A^{\frac{1}{3}}} \quad \ldots \quad (5\cdot1)$$

இங்கு r_0 என்பது ஒரு மாறிலி. இது கருவின் 'ஓரலகு ஆரம்' (unit radius) என்றழைக்கப்படுகிறது.

ருதர்போர்டு, α-துகள் சிதறல் சோதனைகளிலிருந்து அணுக்கருவானது அணுவில் ஒரு மிகச் சிறிய பகுதியாக உள்ளது என அறிந்தார். கருக்களின் ஆரம் அணுக்களின் ஆரத்தில் 10^{-5} முதல் 10^{-6} பகுதிவரை உள்ளது. அணுவின் பரிமாணத்தை அளக்க நாம் ஆங்ஸ்ட்ராம் அலகுகளைப் பயன்படுத்துகிறோம்.

($1\ A{\cdot}U = 10^{-8}$ செ. மீ.) ஆனால் அணுக்கருக்களின் பரிமாணத்தை அளப்பதற்கு ஃபெர்மி (Fermi) என்ற அலகு (f) பயன்படுத்தப்படுகிறது. ($1f = 10^{-13}$ செ.மீ)

பயிற்சிக் கணக்கு 1

$r_0 = 1{\cdot}4 \times 10^{-13}$ செ.மீ. என்ற மதிப்பைக் கொண்டு பின்வரும் அணுக்கருக்களின் ஆரங்களைக் கணக்கிடுக. (i) He^4 (ii) Cd^{112} (iii) Ho^{165} (iv) Fm^{256}. இங்கு 4, 112, 165, 256 என்ற எண்கள் முறையே கருக்களின் அணுநிறை எண் (Mass Number) A-யைக் குறிக்கின்றன.

$$r = r_0 A^{\frac{1}{3}}$$

(i) He^4 $\qquad r = 1{\cdot}4 \times 10^{-13} \times (4)^{\frac{1}{3}}$

$$= 2{\cdot}224 \times 10^{-13} \text{ செ.மீ.}$$

$$= 2{\cdot}224 \text{ f.}$$

(ii) Cd^{112} $\quad r = 1{\cdot}4 \times 10^{-13} \times (112)^{\frac{1}{3}}$

$$= 6{\cdot}794 \times 10^{-8} \text{ செ.மீ.}$$

$$= 6{\cdot}794 \text{ f.}$$

(iii) Ho^{165} $\quad r = 1{\cdot}4 \times 10^{-13} \times (165)^{\frac{1}{3}}$

$$= 7{\cdot}731 \times 10^{-13} \text{ செ. மீ.}$$

$$= 7{\cdot}731 \text{ f.}$$

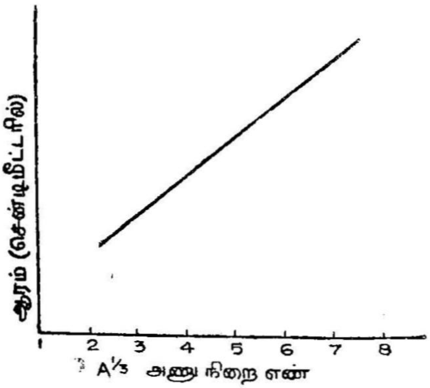
(iv) Fm^{256} $\quad r = 1{\cdot}4 \times 10^{-8} \times (256)^{\frac{1}{3}}$

$$= 8{\cdot}950 \times 10^{-13} \text{ செ. மீ.}$$

$$= 8{\cdot}950 \text{ f.}$$

அணுக்கருவின் ஆரத்தை அளப்பதற்கான முறைகள்.

(அ) இயற்கைக் கதிரியக்கத்தில் கருக்களிலிருந்து உமிழப் படும் α-துகள்களின் இயக்க ஆற்றல்களை அளப்பதிலிருந்து 208 அணுநிறை எண் கொண்ட கருக்களின் ஆரத்தை நாம் தருவிக்



படம் 5·3
கருவின் ஆரத்தையும், அதன் அணுநிறை எண்ணையும் இணைக்கும் வரைபடம்

கலாம். α-கதிர் வீச்சில், α-கதிர் கருவிலிருந்து வெளியே வரு வதன் நிகழ்திறன் அது ஊடுருவ வேண்டிய மின்னழுத்த அரணின் உயரத்தையும், அகலத்தையும் பொறுத்தது. அரணின் உயரம்

கருவின் ஆரத்தையும் α-உமிழ்வின் நிகழ்திறன் வெளிவரும் α-துகளின் ஆற்றலையும் பொறுத்து இருப்பதால் α-துகள்களின் ஆற்றல் α-உமிழியின் ஆரத்தைப் பொறுத்திருக்கிறது. எனவே, α-துகளின் ஆற்றலையும், α-உமிழியின் அரைவாழ்வுக் காலத்தையும் கொண்டு நாம் α-துகள்களை உமிழும் கருக்களின் ஆரங்களைக் கணக்கிடலாம். இவ்வாறு பெறப்பட்ட அணுக்கருக்களின் ஆரங்கள் மேற்கண்ட வரைபடத்தில் (படம் 5·3) கொடுக்கப் பட்டிருக்கிறது.

இம் முறையைக் கொண்டு தருவித்த சில கருக்களின் ஆரங்கள் கீழ்க்கண்ட அட்டவணையில் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன.

அட்டவணை 5·1

குறிப்பிட்ட சில அணுக் கருக்களின் ஆரம்

எண்	கரு	R (in 10^{-13} cms)	r_0
1	Tl^{208}	6·5	1·10
2	Tl^{210}	7·0	1·19
3	Pb^{206}	7·2	1·21
4	Pb^{208}	7·8	1·31
5	Pb^{210}	8·1	1·35
6	Pb^{211}	8·3	1·40
7	Pb^{212}	8·1	1·35
8	Pb^{214}	8·4	1·39
9	Bi^{211}	8·1	1·35
10	Po^{215}	8·4	1·39
11	Po^{216}	8·5	1·40

(ஆ) ஆடிக்கருக்களின் (Mirror Nuclei) பாசிட்ரான் (β^+) கதிரியக்க ஆற்றல்களை அளவிடுவதன் மூலம் கருக்களின் ஆரத்தைக் கண்டறிதல்.

கனமான தனிமங்களின் அணுக்கருக்களில் அதிக புரோட்டான்கள் (கருவில் உள்ள நேர்மின்னூட்டம் கொண்ட துகள்கள்) இருப்பதால் அவற்றிற்கிடையே செயல்படும் நிலையின் கூலும்

விலக்கு விசையும் அதிகமாக இருக்கும். அணு எண் Z-ம் அணு நிறை எண் A-யும் கொண்ட கருவின் கருப்பிணைப்பு ஆற்றலும் (Nuclear Binding Energy), அணு எண் $(Z+1)$-ம், அணு நிறை எண் A-யும் கொண்ட கருவின் கருப்பிணைப்பு ஆற்றலும் சமம் என்று கொள்வோம். அணு நிறை எண் A-யின் மதிப்பு சமமாகவும், அணு எண் Z-ன் மதிப்பு வேருகவும் உள்ள கருக்கள் "ஐசோபார்கள்" என்றழைக்கப்படுகின்றன. ஒரே A-மதிப்புக் கொண்ட, ஆனல் ஒன்றிலுள்ள புரோட்டான்களின் எண்ணிக்கை மற்ருென்றிலுள்ள நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கைக்குச் சமமாக உள்ள கருக்கள் "ஆடிக்கருக்கள்" (Mirror Nuclei) என்றழைக்கப்படுகின்றன. இரண்டாம் கருவில் $Z+1$ புரோட்டான்களும் முதற்கருவில் Z புரோட்டான்களும் இருப்பதால், $Z+1$, புரோட்டான்களைக் கொண்ட கருவின் கூலும் ஆற்றல், Z புரோட்டன்களைக் கொண்ட கருவின் கூலும் ஆற்றலைவிட அதிகமாக இருக்கும். எனவே, முதற்கருவின் பிணைப்பு ஆற்றல் குறைய நேரிடுகிறது. ஆகையால், இத்தகைய ஆடிக்கருக்களின் பிணைப்பு ஆற்றல்களுக்கிடையேயுள்ள வேறுபாட்டிற்கும் இவை உமிழும் பாசிட்ரானின் பெரும ஆற்றல்களுக்கும் இடையேயுள்ள தொடர்பைப் பயன்படுத்தி நாம் r_0-ன் மதிப்பைக் கண்டுபிடிக்கலாம்.

பயிற்சிக் கணக்கு 2

$_{14}Si^{27}$ கருவும், $_{13}Al^{27}$ கருவும் இரு ஆடிக் கருக்களாகும். $_{14}Si^{27}$ ஒரு பாசிட்ரான் உமிழி. அதன் நிரல்முனை ஆற்றல் (Endpoint Energy) 3·48 மி. எ. வோ. ஆகும். புரோட்டான், நியூட்ரான் ஆகியவைகளுக்கிடையே செயல்படும் கருவிசை நியூட்ரானுக்கும், நியூட்ரானுக்கும் இடையே தொழிற்படும் கருவிசைக்குச் சமம் எனக் கொண்டு r_0-ன் மதிப்பைக் கணக்கிடுக.

புரோட்டானின் அமைதிநிலை நிறை-ஆற்றல் = 938·23 மி. எ. வோ. (Restmass Energy)

நியூட்ரானின் அமைதிநிலைநிறை-ஆற்றல் = 939·52 மி. எ. வோ.

$_{14}Si^{27}$-ன் பாசிட்ரான் உமிழ்வைக் கீழ்க்கண்ட சமன்பாடு விளக்குகிறது.

$$_{14}Si^{27} \longrightarrow {}_{13}Al^{27}+\beta^{+}+\nu+3{\cdot}48 \text{ மி. எ. வோ.}$$

(β^{+} = பாசிட்ரான்; ν = நியூட்ரினே)

சமன்பாட்டின் இரு பக்கங்களிலும் உள்ள நிறைகளைச் சரியீடு செய்தால்,

$$_{14}M^{27}C^{2} \longrightarrow {}_{13}M^{27}C^{2}+m_{\beta}C^{2}+3{\cdot}48 \text{ மி. எ. வோ.}$$

இங்கு C-என்பது ஒளியின் திசை வேகத்தையும், M அணுக்கரு நிறைகளையும், m_β என்பது பாசிட்ரானின் நிறையையும் குறிக்கிறது.

$$_{14}\mathrm{Si}^{27} = {}_{14}M^{27}C^2.$$

$$= (14M_P + 13M_n)\, C^2 + \frac{3}{5}\, \frac{e^2}{r} \times 14 \times 13$$

பிணைப்பு ஆற்றல்.

M_p, M_n ஆகியவை முறையே புரோட்டான், நியூட்ரான் ஆகியவற்றின் நிறைகள்.

Z அணு எண் கொண்ட கருவின் கூலும் விசை

$$= \frac{3}{5}\, Z\,(Z-1)\, \frac{e^2}{r} \qquad \ldots \quad (5{\cdot}2)$$

மேற்கண்ட சமன்பாட்டின் வலப்புறத்திலுள்ள முதல் தொடர் கருக்கூறுகளின் மொத்த நிறைக்குச் சமமான ஆற்றலையும், இரண்டாம் தொடர் கருவிலுள்ள புரோட்டான்களிடையே தொழில் படும் கூலும் விலக்கு விசையினால் விளையும் ஆற்றல் அதிகரிப்பையும், மூன்றும் தொடர் கருக்கூறுகளுக்கிடையே செயல்படும் பிணைப்பு ஆற்றல் குறைவையும் குறிக்கின்றன. (e = புரோட்டானின் மின்னூட்டம், r = கருவின் ஆரம்)

நியூட்ரான்-நியூட்ரான் விசை, புரோட்டான்-புரோட்டான் விசைக்குச் சமம் என்று கொண்டால் (மின்னூட்டச் சரிச்சீரமைவு Charge symmetry) கருக்களிலுமுள்ள கருக்கூற்றிடை விசையினால் ஏற்படும் பிணைப்பு ஆற்றல்களும் சமமாக இருக்கும். எனவே

$$(14M_p + 13M_n)\, C^2 + \frac{3}{5}\, \frac{e^2}{r} \times 14 \times 13$$

$$= (13M_p + 14M_n)\, C^2 + m_p C^2 + \frac{3}{5}\, \frac{e^2}{r} \times 13 \times 12 + 3{\cdot}48$$

மி. எ. வோ.

தொடர்களை வரிசைப்படுத்தினால்

$$\frac{3 \times 13}{5} \times \frac{e^2}{r} = (M_n - M_p + M_\beta)\, C^2 + 3{\cdot}48 \text{ மி. எ. வோ.}$$

என்பது கிடைக்கிறது. எனவே

$$\frac{78}{5}\, \frac{e^2}{r} = (1{\cdot}80 + 3{\cdot}48) \text{ மி. எ. வோ.}$$

இங்கு $(M_n - M_p)C^2 = 180$ மி. எ. வோ.

$$= 5\cdot28 \times 1\cdot6 \times 10^{-6} \text{ எர்குகள்.}$$

இடது பக்கத்தில் இருக்கும் r-க்கு $r_0 A^{\frac{1}{3}}$ என்ற மதிப்பைச் சரியீடு செய்தால்

$$\frac{78e^2}{5 \times r_0 \times (27)^{\frac{1}{3}}} = 5\cdot28 \times 1\cdot6 \times 10^{-6}$$

எனவே, $$r_0 = \frac{78 \times (4\cdot8 \times 10^{-10})^2}{5 \times 5\cdot28 \times 1\cdot6 \times 10^{-6} \times (27)^{\frac{1}{3}}}$$

$$= 1\cdot42 \times 10^{-13} \text{ செ. மீ.}$$

$$= 1\cdot42 \text{ f.}$$

இம் முறையினல் கணக்கிடப்பட்ட சில கருக்களின் ஆரங்கள் பின்வரும் அட்டவணையில் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன.

அட்டவணை 5·2

சில கருக்களும் அவற்றின் r_0 மதிப்புகளும்

எண்	கரு	R	r_0
1	B^{11}	3·2	1·42
2	C^{13}	3·4	1·46
3	N^{15}	3·5	1·41
4	O^{17}	3·6	1·39
5	F^{19}	3·9	1·47
6	Na^{23}	4·1	1·46
7	Ae^{27}	4·2	1·39
8	Si^{29}	4·5	1·46
9	P^{29}	4·6	1·47
10	S^{33}	4·7	1·46
11	Ce^{35}	4·8	1·46
12	Cu^{41}	5·2	1·50

(இ) நியூட்ரான்—அணுக்கரு மோதல்

அதிகத் திசை வேகமுடைய நியூட்ரான்களைக் கருக்களோடு மோதச் செய்து அதனால் விளையும் சிதறலைப் பரிசோதித்து அணுக் கருக்களின் ஆரங்களைக் கண்டறியலாம். இம் முறையில் கருவில் பொருள் எவ்வாறு பரவியிருக்கிறது என்று அறிய முடியும். இச் சிதறல் பரிசோதனைகளில் நியூட்ரான்களுக்குப் பதிலாக அதிக வேகமுடைய எலக்டரான்களையும் பயன்படுத்தலாம். எலக்ட்ரான்களைப் பயன்படுத்தினால் அணுக் கருவில் மின்னூட்டம் எவ்வாறு பரவியிருக்கிறது என்று அறியலாம். இம் முறையினால் கிடைத்த r_0-ன் மதிப்பு $1{\cdot}2 \times 10^{-13}$ ஆகும்.

(ஈ) ஐசோடோப்பினால் ஏற்படும் நிரல் நகர்வு (Isotopic Shift in Spectral Lines)

கருவின் அளவு அணுவிலுள்ள எலக்ட்ரானின் ஆற்றலை ஓரளவிற்கு மாற்றுகிறது எனலாம். இந்த எலக்ட்ரான்களின் நிலை ஆற்றல் எல்லாம் $\frac{-Ze^2}{r}$ ஆக இருக்க முடியாது. எனவே கருவின் அளவு, அணு ஆற்றல் மட்டங்களைப் பாதிக்கிறது. இத் தகைய பாதிப்பு மிகச் சிறியதாக இருந்தபோதிலும், அணு நிரலில் சிறு அளவு நகர்வை ஏற்படுத்துகிறது. இதனை "ஐசோடோப்பு நிரல் நகர்வு" என அழைக்கின்றனர். அதிக அளவு பகுதிறனுடைய நிரல்மானிகளைக் கொண்டு இந்த நகர்வை அளக்கலாம், இவ் வளவீடுகளிலிருந்தும் அணுக் கருக்களின் ஆரங்களைக் கண்டறியலாம்.

(உ) மீசான்—அணுக்கள்

அணுக்கருவின் அருகே மீசான்கள் என்ற ஒரு வகைத் துகள் கள் உற்பத்தியாகின்றன. இம் மீசான்கள் $-e$ மின்னூட்டத்தையும், எலக்ட்ரான்களைப் போல ஏறத்தாழ 207 மடங்கு நிறையும் கொண்டவை. அணுக் கருக்களோடு இவை சில வலிமையற்ற செயலீடுகள் (Weak Interaction) நிகழ்த்துகின்றன. எலக்ட்ரான் களைக் காட்டிலும் மீசான்கள் அதிக நிறை கொண்டிருப்பதால் இவற்றின் அலைத் தொடர் (Wave function) அணுக் கருவின் அளவிற்குப் பரவி இருக்கிறது. எனவே, அணுக் கருவின் அளவு, அணு ஆற்றல் மட்டங்களைப் பாதிப்பதால் X கதிர் நிரல் ஒன்று உண்டாகிறது. இந் நிரலை அளப்பதிலிருந்தும் கருக்களின் ஆரத்தைப் பெறலாம்.

மேற்கண்ட அளவீடுகளிலிருந்து r_0-ன் மதிப்பு $1{\cdot}2$ f-லிருந்து $1{\cdot}5$ f வரை மாறுகிறது. r_0-ன் மதிப்பை $1{\cdot}4$ f என்று எடுத்துக்

கொண்டு Br^{80} கருவின் ஆரத்தைக் கணக்கிட்டால் நமக்குக் கிடைப்பது *6·0 f*. அவ்வாறே U^{238} கருவின் ஆரத்தைக் கணக்கிட்டால் *11·8 f* என்று கிடைக்கிறது. இதிலிருந்து அணு நிறை எண் மூன்று மடங்காக மாறினால் அதன் ஆரம் இரு மடங்காக மாறும் எனத் தெரிகிறது.

5·4 அணுக்களின் ஆக்கம்

நேர் மின்னூட்டம் கொண்ட அணுக்கரு எந்த அடிப்படைத் துகள்களைக் கொண்டு உருவாக்கப்பட்டிருக்கிறது என்பதை அநேக விஞ்ஞானிகள் அறிய முற்பட்டனர். முதலில் அணுக்கருவின் உண்மையான அடிப்படைத் துகள்களைப் 'பிரௌட்' (Prout) என்ற விஞ்ஞானி கண்டுபிடித்தார். எல்லா இலேசான தனிமங்களின் அணு நிறைகளும் முழு எண்களாக அமைந்திருப்பதைக் கொண்டு, எல்லாத் தனிமங்களின் கருக்களும் ஹைடிரஜன் அணுக் கருக்களைக் கொண்டே உருவாக்கப்பட்டிருத்தல் வேண்டும் என நம்பினர். எலக்ட்ரான்களுக்கு நிறை இல்லை எனக் கொண்டு அணுவின் எடை கருவின் எடைக்குச் சமம் என்று கொண்டார். எனவே, அவர் கோட்பாட்டின்படி (Prout's Hypotheses), எல்லாக் கருக்களும் ஹைடிரஜன் கருக்களையே அடிப்படைத் துகள்களாகக் கொண்டிருக்கவேண்டும். அதாவது எல்லாக் கருக்களும் புரோட்டான்களைக் கொண்டே (ஹைடிரஜன் அணுக்கரு) அமைக்கப்பட்டிருக்கவேண்டுமென நினைத்தனர்.

இயற்கைக் கதிரியக்கத்தில் கருக்களிலிருந்து எலக்ட்ரான்கள் வெளிவருவது கண்டு கருக்களில் புரோட்டான்களுடன் எலக்ட்ரான்களும் இருக்கக்கூடும் என நினைத்தனர். அதாவது, சில காலம் வரை கருவின் ஆக்கத்திற்கான, பலராலும் நம்பப்பட்ட, புரோட்டான் – எலக்ட்ரான் கொள்கை உருவெடுத்தது. இக் கோட்பாட்டினால் அணு எண், அணு நிறை எண் கணிப்பு சரியாக அமைந்திருந்தமையால் இக் கோட்பாடு உண்மையாக இருக்கலாமோ என்ற எண்ணம் எழுந்தது.

காட்டாக, கரியின் கருவை ($_6C^{14}$) எடுத்துக்கொள்வோம். மேற்கூறியபடி கரியின் அணு எண் $Z = 6$. அதன் அணு நிறை எண் $A = 14$. எனவே, கருவில் 14 புரோட்டான்கள் இருத்தல் வேண்டும். இவற்றோடு 8 எலக்ட்ரான்களும் கருவில் பொதிந்து கிடப்பதால் கருவின் நிகர மின்னூட்டம் 6 நேர் மின்னூட்ட அலகுகளாகும். கருவிற்கு வெளியே இயங்கும் எலக்ட்ரான்களின் நிகர மின்னூட்டம் 6 எதிர் மின்னூட்ட அலகுகளாகும். எனவே, இவை இரண்டையும் சேர்த்தால் அணுவின் மின்னூட்டமற்ற

தன்மை கிடைக்கிறது. மேலும், எலக்ட்ரான்களுக்கு நிறை இல்லை என்று கொண்டால், கருவின் அணு நிறை எண் 14 ஆகிவிடுகிறது. இப்படியே மற்றக் கருக்களின் அமைப்பையும் புரோட்டான்–எலக்ட்ரான் கோட்பாட்டினைக் கொண்டு விளக்க முடியும். பொதுவாக ஓர் அணுவின் அணு நிறை எண் A-ஆகவும், அணு எண் Z ஆகவும் இருப்பின். இக் கோட்பாட்டின்படி கருவில் A புரோட்டான்களும், $(A—Z)$ எலக்ட்ரான்களும் இருக்க வேண்டும். இக் கணக்கீட்டின்படி முறையே அ. நி. எ. A, அணு எண் Z கொண்ட கருவிலுள்ள துகள்களின் மொத்த எண்ணிக்கை $A+(A—Z)$ அல்லது $2A—Z$ ஆக இருக்கவேண்டும்.

பல காரணங்களால் அணுக் கருவில் எலக்ட்ரான்கள் இருக்க முடியாது என்பது உண்மையாக்கப்பட்டுவிட்டது. அக் காரணங்களில் சில பின்வருமாறு :

(அ) அணுக் கருவில் எலக்ட்ரான்கள் தங்குவதற்குப் போதிய இடம் இல்லை. அணு எண் $A = 1$ உள்ள ஹைடிரஜன் கருவை எடுத்துக்கொள்வோம். அதன் ஆரம் 3×10^{-13} செ. மீ. ஆகும். அதன் விட்டம் 6×10^{-13} செ. மீ. ஆகும். எலக்ட்ரானின் டி பிராக்லி அலை நீளம் $1{\cdot}2 \times 10^{-12}$ செ. மீ. இவ் வலை நீளத்தைக் கொண்ட எலக்ட்ரான்கள் கருவில் அடங்கியிருக்க வேண்டுமாயின், அதன் பிணைப்பு ஆற்றல் ஏறத்தாழ ஒரு துகளுக்கு 100 மி. எ. வோ. ஆக இருக்கவேண்டும். ஆனால், அணுக்கருவில் உள்ள துகள்களின் பிணைப்பு ஆற்றல் 8 மி. எ. வோ. / துகள் ஆக இருக்கிறது. இதனால், கருவில் எலக்ட்ரான் அடங்கியிருக்க முடியாது என்பது தெளிவாகின்றது.

(ஆ) கருவின் புரோட்டான் எலக்ட்ரான் கோட்பாட்டிற்கெதிரான இரண்டாவது காரணம், அதன் தற்சுழற்சிக் கோண உந்தத்தைப் பொறுத்தது. (Spin angular momentum) நிரல்களின் மீநுண் வரியமைப்பிலிருந்து (Hyperfine structure of spectral lines) அணுக்கருக்களின் தற்சுழற்சியைக் கண்டுபிடிக்கலாம். எலக்ட்ரானின் தற்சுழற்சி (Spin) $\frac{1}{2}$ ஆகும். $(\hbar = 1)$. புரோட்டான்களும் தற்சுழற்சியை $\frac{1}{2}$ ஆகக் கொண்டுள்ளன. இப்போது டியூட்ரான் கருவை எடுத்துக்கொள்வோம். புரோட்டான்-எலக்ட்ரான் கோட்பாட்டின்படி, டியூட்ரான் கருவில் 2 புரோட்டான்களும் ஓர் எலக்ட்ரானும் இருக்கவேண்டும். எனவே, அதன் தற்சுழற்சிக் கோண உந்தம், $\frac{3}{2}$, $\frac{1}{2}$, $-\frac{1}{2}$ அல்லது $-\frac{3}{2}$ ஆகத்தான் இருக்கமுடியும். ஆனால், சோதனை மூலம் டியூட்ரானின் தற்சுழற்சி 1 என்பது கண்டுபிடிக்கப்பட்டது.

இதனாலும் கருவில் எலக்ட்ரான் இருக்க முடியாது என்பது புலனாகின்றது.

(இ) இயற்கைக் கதிரியக்கத்தில் β-துகள்கள் உமிழப்படுவதால் கருவில் எலக்ட்ரான்கள் இருக்கின்றன என ஊகிக்கலாம். ஆனால், இஃதே கருவில் எலக்ட்ரான்கள் இருக்கமுடியாது என்பதற்கும் ஒரு காரணமாக அமைகிறது எனலாம். அணுக் கருவில் இருக்கும் எலக்ட்ரான்களின் ஆற்றல் சுழியாக இருந்தால், அதனின்றும் எலக்ட்ரான்கள் வெளிவரா; சுழியை விட அதிகமாக இருப்பின் தாமாகவே கருவிலிருந்து வெளியேறக் கூடும். ஏனெனில், எலக்ட்ரான்களுக்கு நிலைமின் ஆற்றல் அரண் (Coulomb barrier) எதுவும் கிடையாது. மேலும் வெளியேறும் β-துகள்கள் வெவ்வேறு ஆற்றல்களைக் கொண்டிருப்பதாலும், β-உமிழிகள் அதிக அரை வாழ்வுக் காலம் பெற்றிருப்பதாலும், அவற்றில் எலட்ரான்கள் இருக்க முடியாது என அறியலாம்.

(ஈ) எலக்ட்ரானின் காந்த இருமுனைச் சுழல்திறன், கருவின் சுழல்திறனைவிட அதிகமாக இருக்கின்றபடியால் அணுக்கருவில் எலக்ட்ரான்கள் இருக்கமுடியாது என முடிவு செய்யலாம்.

1932 ஆம் ஆண்டில் சாட்விக் என்பவர், மின்னூட்ட மற்றதும், ஏறத்தாழப் புரோட்டானின் நிறையைக் கொண்டதுமான ஒரு வகைத் துகளைக் கண்டுபிடித்தார். இதனை நியூட்ரான் என அவர் அழைத்தார். இதன் பின்னர்தான் அணுக் கருக்களில் புரோட்டான்களைத் தவிர நியூட்ரான்களும் இருக்கலாம் என்ற முடிவு ஏற்பட்டது. இந்த 'நியூட்ரான்-புரோட்டான்' கொள்கைப்படி அணுக் கருவின் அமைப்பை இப்பொழுது ஆராய்வோம்.

அணுக் கரு நேர் மின்னூட்டம் கொண்ட புரோட்டான்களையும், அதற்கு ஏறத்தாழச் சமமான நிறை கொண்ட மின்னூட்டமற்ற நியூட்ரான்களையும் கொண்டது எனக்கொண்டு, சில அணுக் கருக்களின் அமைப்பைக் கவனிப்போம். கருவின் அணு நிறை A கருவிலுள்ள மொத்த துகள்களின் எண்ணிக்கையையும், அணு எண் Z அதிலுள்ள புரோட்டான்களின் எண்ணிக்கையையும், குறிப்பிட்டால் $N = A - Z$ என்பது கருவிலுள்ள நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கையைக் குறிக்கும்.

முதலில் டியூட்ரானை எடுத்துக் கொள்வோம். டியூட்ரானின் அணு எண் 1. அணுநிறை எண் 1. எனவே டியூட்ரான் கருவில்

ஒரு புரோட்டானும் ஒரு நியூட்ரானும் இருக்கிறது என யூகிக்கலாம். புரோட்டானின் தற்சுழற்சி $\frac{1}{2}$ ஆகவும், நியூட்ரானின் தற்சுழற்சி $\frac{1}{2}$ ஆகவும் இருப்பதால் டியூட்ரானின் தற்சுழற்சி 1 ஆக இருக்க வேண்டுமென்பது பெறப்படுகிறது. சோதனை மூலம் கண்டறியப்பட்ட டியூட்ரானின் தற்சுழற்சியும் ஒன்றே. இதனின்றும் இக் கொள்கையின் உண்மை நன்கு விளங்குகிறது. காட்டாக $_6C^{12}$ கருவை எடுத்துக்கொள்வோம். (6 என்பது அணு எண்ணையும் 12 என்பது அணுநிறை எண்ணையும் குறிக்கும்.) இதில் உள்ள மொத்தத் துகள்கள் 12. நேர்மின்னேற்றம் கொண்ட புரோட்டான்களின் எண்ணிக்கை 6. அதாவது $A = 12, Z = 6$. இதைப் போலவே ஆக்ஸிஜன் ($_8O^{16}$) அணுக் கருவிலும் 8 புரோட்டான்களும் 8 நியூட்ரான்களும் உள்ளன. யுரேனியம் கருவில் ($_{92}U^{238}$) 92 புரோட்டான்களும் 146 நியூட்ரான்களும் உள்ளன.

கருத் துகள்களான நியூட்ரான், புரோட்டான் ஆகிய இரண்டும் "நியூக்லியான்" என்று பொதுவாக அழைக்கப்படுகின்றன; இரண்டும் சமமான நிறையும், தற்சுழற்சிக் கோண உந்தமும் கொண்டவை. ஆனால், ஒன்று நேர்மின்னூட்டமும், மற்றொன்று மின்னூட்ட மற்றும் உள்ளன. எனவே, இவை இரண்டையும் ஒரே தன்மை கொண்ட, ஆனால், இரு வேறுபட்ட மின்னூட்ட நிலைகளிலுள்ள (Charge state) துகள்கள் எனக் கொள்ளலாம். எனவே, ஒவ்வொரு கருவிலும் Z புரோட்டான்களும் $(N = A - Z)$ நியூட்ரான்களும் அல்லது A நியூக்லியான்கள் மிகச் சிறிய நெடுக்கமுள்ள, வலிமையுள்ள ஈர்ப்பு விசையினால் மிக அழுத்தமாகப் பிணைக்கப்பட்டிருக்கின்றன என்று கொள்ளலாம்.

5·5. அணுக் கருவின் மின்னழுத்த அரண் அல்லது "கூலும் அரண்".

அணுக் கருக்களில் புரோட்டான்களும் நியூட்ரான்களும் பிணைந்து கிடப்பதால், அதற்கு ஓர் உருவும், பரிமாணமும் உண்டென்று முன்பே பார்த்தோம். அணுக் கருவில் நேர் மின்னூட்டமுடைய புரோட்டான்கள் இருப்பதால், அணுக்கரு நேர் மின்னூட்டம் கொண்டதாக இருக்கிறது எனவும் பார்த்தோம். இதனை ரூதர் போர்டின் α-துகள் சிதறல் சோதனை ஐயமற விளக்கியது.

ஒரு கருவின் அருகில் மற்றொரு நேர் மின்னூட்டம் கொண்ட துகள் வரும்பொழுது இரண்டிற்குமிடையே ஒரு விலக்கு விசை

செயல்படுவது இயற்கை. இவ் விசையினால் ஏற்படும் நிலையாற்றல் "அணுக்கரு கூலும் அரண்" (Nuclear Coulomb barrier) என அழைக்கப்படுகிறது. கூலும் விலக்கு விசை இரு நேர் மின்னூட்டங்களுக்கிடையே செயல்படும் விசையாதலால், அதனைக் கூலும் விதியைக் கொண்டு தருவிக்கலாம். $Z_1 e$, $Z_2 e$ என்பன முறையே முதலாவது, இரண்டாவது கருக்களின் நேர் மின்னூட்டங்களானால் கூலும் விதிப்படி அவற்றிற்கிடையே நிலவும் நிலை மின் ஆற்றல்

$$V = \frac{(Z_1 e)(Z_2 e)}{D} \qquad \ldots \quad (5{\cdot}3)$$

இங்கு $e = 4{\cdot}8 \times 10^{-10}$ நிலைமின் அலகுகள் (புரோட்டானின் நேர் மின்னூட்டம்)

Z_1, Z_2 = அணு எண்கள்

D = இரண்டு கருக்களுக்கு இடையே உள்ள தொலைவு (சென்டி மீட்டரில்)

காட்டாக, U^{238} கரு, ஒரு α துகள் ஆகியவற்றிற்கிடையே நிலவும் நிலை மின்னாற்றலைக் கணக்கிடுவோம். அவை இரண்டும் ஒன்றோடொன்று சேர்ந்திருக்கின்றபொழுது D-ன் மதிப்பு

$D = R_u + R_\alpha$ ஆகும்.

R_u என்பது யுரேனியக் கருவின் ஆரத்தையும், R_α என்பது α துகளின் ஆரத்தையும் குறிக்கின்றன. எனவே,

$$V = \frac{Z_1 \ Z_2 \ e^2}{R_u + R_\alpha}$$

$$= \frac{(92 \times 2)\ (4{\cdot}8 \times 10^{-12})^2}{(1{\cdot}4 \times 10^{-13})\ \left((238)^{\frac{1}{3}} + 4^{\frac{1}{3}}\right)}$$

$$= 3{\cdot}88 \times 10^{-5} \text{ எர்குகள்.}$$

அணுக்கரு இயற்பியலில் ஆற்றல்களை **மில்லியன் எலக்ட்ரான் வோல்ட்டுகளில்** கணிப்பது வழக்கம்.

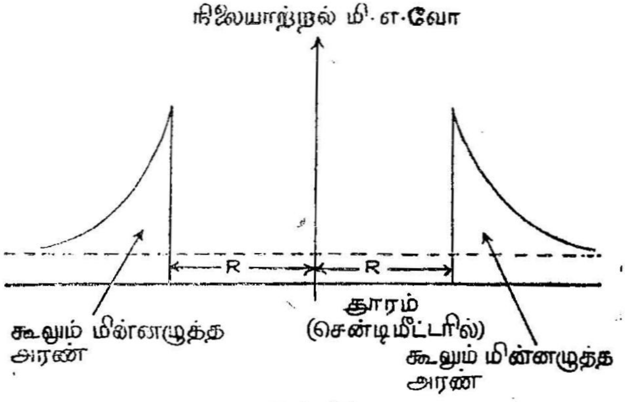
$$1 \text{ எர்கு} = 6{\cdot}24 \times 10^5 \text{ மி. எ. வோ.}$$

எனவே $V = 3{\cdot}88 \times 10^{-5} \times 6{\cdot}24 \times 10^5$
$= 24{\cdot}2$ மி. எ. வோ.

பண்டைய எந்திரவியலின் விதிகளையொட்டிப் பார்த்தால், ஒரு α துகள் U^{238} அணுக்கருவை அடைந்து அதனுடன் சேர

வேண்டுமாயின் அதன் இயக்க ஆற்றல் 24·2 மி. எ. வோ.-க்கு மேலாக இருக்கவேண்டும். இதற்குக் குறைந்த இயக்க ஆற்றல் கொண்ட α துகள்களெல்லாம் மேற்கூறிய மின்னழுத்தத் தடுப்பைக் கடக்க முடியாது. அதாவது α துகள் U^{238} கருவோடு சேர்வதற்கு முன்பே எதிர்த்துத் தள்ளப்படும். ஆனால், இதற்குக் குறைவான இயக்க ஆற்றல்களைக் கொண்ட α துகள்களும் இயற்கைக் கதிரியக்கத்தில் உமிழப்படுகின்றன. அதாவது, இதைவிடக் குறைந்த ஆற்றல் பெற்ற α துகள்களெல்லாம் மேற்கூறிய மின்னழுத்த அரணைக் கடந்துவிடுகின்றன எனலாம். இதனைப் பண்டைய இயற்பியல் விதிகள் கொண்டு விளக்கமுடியாது. ஆனால், குவான்டம் இயற்பியல் இத்தகைய 'துளைத்துச் செல்லல்' (Tunnelling) நிகழக்கூடும் என்று தெரிவிக்கின்றது, அணுக்கரு "மின்னழுத்த அரண்", படத்தில் காட்டியிருப்பது போன்ற ஒரு முகடு வடிவம் கொண்டது.

படத்தில் காட்டியிருப்பதுபோல் α துகளுக்கும், கருவிற்கும் இடையேயுள்ள தொலைவு அணுக்கரு ஆரத்திற்குக் குறைவாக இருக்கும்போது α துகளும் கருவும் நன்றாகப் பிணைக்கப்பட்டு விடும்.



படம் 5·4
யுரேனியம் ஹீலியம் கருக்களுக்கான அணுக்கருக் கூடும் மின்னழுத்த அரணும் நிலையாற்றல் பள்ளமும்

5·6 அணுக்கருவின் நிறை

அணுக்கருக்கள் மிகச் சிறியவையாக இருந்தபோதிலும் அவற்றின் நிறையைப் பல்வேறு நிறைநிரல்மானிகளைக்

கொண்டு (Mass Spectrometers) மிகத் துல்லியமாக அளக்க முடியும் (நிலையாக உள்ள எல்லாக் கருக்களின் நிறைகளும் அணுக்களின் நிறைகளிலிருந்துதான் கணிக்கப்படுகின்றன). கருவின் நிறையை அணுவின் நிறையிலிருந்து கீழ்க்கண்டவாறு பெறலாம்.

கருவின் நிறை = அணுவின் நிறை – அணுவில் உள்ளடங்கிய எலக்ட்ரான்களின் மொத்த நிறை.

அணுக்களின் நிறை அணு நிறை அலகு (அ.நி.அ – a.m.u.) என்ற அலகுகள் கொண்டு அளக்கப்படுகின்றன.

ஓர் அணுநிறை அலகு = $\frac{1}{12} \times C^{12}$ ஐசோடோப்பின் நிறை. வேதியியலில் ஆக்ஸிஜன்^{16} ஐசோடோப்பு நிறையின் பதினாறில் ஒரு பங்கு ஒரு அணு நிறை அலகு என்று வரையறுக்கப்பட்டிருக்கிறது. இயற்பியல் துறையினருக்கு இவ்வலகு அவ்வளவு பயன்படும் வகையில் இல்லாதபொழுதும், வேதியல் துறையினர் இதனைப் பெரிதும் பயன்படுத்தி வந்தமையால் இயற்பியலிலும் இவ்வலகு அதிக அளவு பயன்படுத்தப்படுகிறது. இதனைக் கரி^{12} ஐசோடோப்பின் 12-ல் ஒரு பகுதி எனவும் வரையறுத்துக் கூறலாம். ${}_8O^{16}$ அணுவின் ஒரு கிராம் – அணு N அணுக்களைக் கொண்டது. இங்கு N என்பது அவகாட்ரோ எண் ஆகும். இதன் மதிப்பு $N = 6{\cdot}02486 \times 10^{23}$. எனவே ${}_8O^{16}$ அணுவின் நிறை $16/N$ எனவே

$$1.\ \text{அ.நி.எ.} = \frac{1}{16} \times \frac{16}{N}\ .$$

ஓர் அணுநிறை அலகு $= 1{\cdot}66 \times 10^{-24}$ கிராம்.

நிலையான நீண்ட வாழ்வுக் காலங்களைக் கொண்ட கருக்களின் நிறைகளை மிகத் துல்லியமாக நிறைநிரல்மானிகளைக் கொண்டு அளக்கலாம் என்று முன்பே பார்த்தோம். எந்தக் கருக்களின் நிறைகள் அளக்கப்பட வேண்டுமோ அந்தக் கருக்கள் கொண்ட அதிக வேகமுடைய அயனிகளைக் காந்தப் புலங்களைக் கொண்டு அல்லது மின்புலத்தைக் கொண்டு வெற்றிடம் ஒன்றில் வளையச் செய்து அவ்வளைவுகளை அளத்தலின்மூலம் பெறலாம்.

நிறைக்குறை

அணுக்கருக்களின் நிறைகளை M என்று கொள்வோம். இவை முன் கண்டபடி அணு நிறை அலகுகளால் அளக்கப்படுகின்றன. அணுக் கருக்களின் அணு நிறை எண் A, கருவில் அடங்கியுள்ள

மொத்தத் துகள்களின் எண்ணிக்கையைக் கொடுக்கிறது. A ஒரு முழு எண். ஆனால் M ஓர் எண்ணைவிடச் சிறிது குறைவாகவோ அல்லது அதிகமாகவோ உள்ளது. சில கருக்களில் M-ன் மதிப்பு A-ஐவிடச் சிறிது அதிகமாகவும், சில கருக்களில் குறைவாகவும் உள்ளது. M, A ஆகியவைகளின் வேறுபாட்டை ΔM என்று கொண்டோமானால்

$$M = A \pm \Delta M \qquad \ldots \quad (5{\cdot}4)$$

ΔM. நிறைக்குறை (Mass Defect) என அழைக்கப்படுகிறது. எனவே,

$$\Delta M = M - A \qquad \ldots \quad (5{\cdot}5)$$

எனக் கொண்டோமானால், ΔM என்பது சில கருக்களில் நேர்க் குறி கொண்டதாகவும், வேறு சில கருக்களில் எதிர்க்குறி உடையதாகவும் உள்ளது. சில கருக்களின் ΔM மதிப்பு கீழ்க் கண்ட அட்டவணையிற் கொடுக்கப்பட்டுள்ளது.

அட்டவணை 5·3

சில அணுக்களின் நிறைக்குறை (அ. நி. அலகுகளில்)

எண்	கரு	M	A	ΔM
1	$_1H^1$	1·00 78 25	1	0·00 78 25
2	He^4	4·00 26 03	4	0 00 26 03
3	O^{16}	15·99 49 15	16	—0 00 55 05
4	Cl^{35}	34 96 68 51	35	—0·03 11 49
5	Sn^{120}	119·90 21 92	120	—0·09 78 02

$C^{12} = 12{\cdot}00\ 00\ 00$ அ. நி. அலகுகள்.

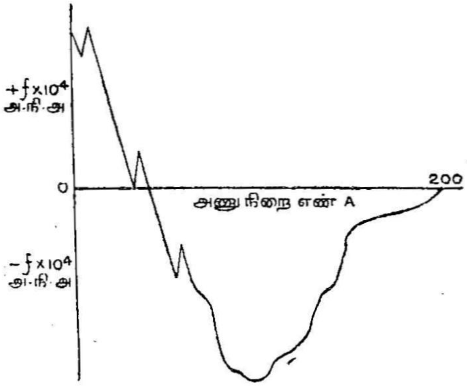
நிறைக்குறையைத் தவிர "பொதிவுத் தகைவு" (Packing fraction) என்ற மற்றோர் அளவும் கருக்களின் உறுதி நிலையை அறிய உதவுகிறது. இதனை f-என்று கொண்டோமானால்

$$f = \frac{\Delta M}{A} = \frac{M - A}{A} \qquad \ldots \quad (5{\cdot}6)$$

பொதிவுத் தகைவைக் கீழ்க்கண்டவாறு வரையறுக்கலாம்.

ஒரு கருவின் நிறைக்குறைக்கும் அதன் அ. நி. எண்ணிற்கும் உள்ள தகைவே "பொதிவுத் தகைவு" எனப்படுகிறது. ΔM-ன்

மதிப்பு நேர்க்குறி உடையதாயும், எதிர்க்குறி உடையதாயும் இருப்பதால் பொதிவுத் தகைவும் நேர்க்குறி அல்லது எதிர்க்குறி உடையதாக இருக்கும். (படம் 5·5). சில கருக்களின் பொதிவுத் தகைவிற்கும், அ. நி. எண்ணிற்கும் இடையே ஒரு வரைபடம் வரைந்தால் அது படம் 5·5-ல் காட்டியவாறு அமையும்.



படம் 5·5

அணுநிறை எண் *A*-க்கும் பொதிவுத் தகைவிற்கும் இடையே வரைந்த படம்

5·7 பிணைப்பு ஆற்றல் (Binding Energy)

அணு எண் Z, அ. நி. எண் A உடைய அணுக்கருவில் Z புரோட்டான்களும் $A-Z$ நியூட்ரான்களும் இருப்பதாகவும், அவை அதிக வலிமை வாய்ந்த ஈர்ப்பு விசையினல் ஒன்ருகப் பிணைக்கப்பட்டு ஒரு கருவாக அமைவதாகவும் முன்பே பார்த்தோம். ஓர் அணுக்கருவின் நிறையானது, அக் கரு உருவாகக் காரணமான புரோட்டான்கள், நியூட்ரான்கள் ஆகியவற்றின் மொத்த நிறைக்குக் குறைவாகவே உள்ளது. Z புரோட்டான்கள் $A-Z$ நியூட்ரான்கள் உள்ள கருவின் நிறையை M_n என்று கொண்டால்

$$M_N < Z \cdot M_p + (A-Z)M_n \quad \dots \quad (5\cdot7)$$

இங்கு M_n என்பது அ. நி. அலகுகளில் நியூட்ரானின் நிறையையும், M_p என்பது அதே அலகுகளில் புரோட்டானின் நிறையையும் குறிக்கிறது. துகள்கள் ஒன்றுசேரும்பொழுது கருவாக மாறுகின்றன.

1905ஆம் ஆண்டு 'ஐன்ஸ்டீன்' என்ற மாபெரும் இயற்பியல் வல்லுநரால் உருவாக்கப்பட்ட தனிச் சார்புக் கொள்கையினின்று

(Special theory of Relativity) நிறையும் ஆற்றலும் ஒரே பொருளின் இரு தோற்றங்கள் எனவும், இவற்றில் ஒன்றிலிருந்து மற்றொன்றுக்குச் சுலபமாக மாற்றஞ் செய்யக் கூடும் எனவும் கண்டோம். இம் மாற்றத்திற்கான சமன்பாடு

$$E = M_0 c^2$$

என்றும் பார்த்தோம். இங்கு M_0 என்பது பொருளின் அமைதி நிலை நிறை; E என்பது பொருள் ஆற்றலாக மாறும்பொழுது கிடைக்கும் ஆற்றல்; c என்பது ஒளியின் திசை வேகம்.

ஒரு குறிப்பிட்ட அளவு நிறை என்ன ஆயிற்று என்ற வினு தானுகவே எழும். இந்த நிறை வேறுபாட்டிற்குச் சமமான ஆற்றல் துகள்கள் ஒன்ருகப் பிணைவுறுவதற்குப் பயன்படுத்தப் பட்டது என்று கொண்டால், துகள்கள் பிணைவுறுவதற்கு வேண்டிய ஆற்றலும் இந்த நிறை வேறுபாடும் சமமாக இருக்க வேண்டும். எனவே, ஐன்ஸ்டீனின் நிறை-ஆற்றல் சமன்பாட்டின் படி, துகள்கள் பிணைவுற்று ஒரே கருவாவதற்கு வேண்டிய ஆற்றல் B என்று கொண்டால்

$$B = \left\{ [ZM_p + (A - Z)M_n] - M_N \right\} c^2 \qquad \ldots \quad (5{\cdot}8)$$

B என்பது கருவின் பிணைப்பு ஆற்றல் (binding energy) என அழைக்கப்படுகிறது. இதனைப் பின்வருமாறு வரையறுக்கலாம். "ஒரு தனிக் கருவை அதன் ஆக்கக் கூறுகளான புரோட்டான், நியூட்ரான்களாகச் சிதைப்பதற்கு வேண்டிய ஆற்றலைக் கருவின் 'பிணைப்பு ஆற்றல்' எனலாம்."

இது வெவ்வேறு அணுக்களுக்கு வெவ்வேருக அமைகிறது. ஒரு கருவின் பிணைப்பு ஆற்றலுக்கும், அதன் அ. நி. எண்ணிற்கு முள்ள தகைவு பெரும்பாலும் இயற்பியலில் பயன்படுத்தப்பட்டு வருகிறது. இது பிணைப்புத் தகைவு (binding fraction) எனப் படுகிறது.

$$\text{பிணைப்புத் தகைவு } \overline{B} = B/A \qquad \ldots \quad (5{\cdot}9)$$

இச்சமன்பாட்டில், B-யின் மதிப்பைச் சமன்பாடு (5·8)-லிருந்து சரியீடு செய்தால்

$$\overline{B} = \frac{\left[\left\{ zM_p + (A - Z)M_n \right\} - M_N \right] c^2}{A} \qquad \ldots \quad (5{\cdot}10)$$

என ஆகும்.

இத் தகைவு முன்பு நாம் பார்த்து 'பொதிவுத் தகைவு' போன்றது எனலாம். இந்த இரண்டு தகைவுகளுக்குமிடையே யுள்ள தொடர்பைக் கீழ்க்கண்டவாறு தருவிக்கலாம்.

$$f = \frac{M-A}{A} \text{ சமன்பாடு} \qquad \ldots \quad (5{\cdot}6)$$

அல்லது

$$M = A\,(1 + f).$$

இப்பொழுது

$$B = \Delta M = [ZM_p + (A-Z)\,M_n] - M$$

$$\overline{B} = \frac{B}{A} = \frac{Z}{A}\,M_p + \left(1 - \frac{Z}{A}\right)M_n - M$$

$$= \frac{Z}{A}\,[\,M_p - M_n\,] + M_n - (1 + f)$$

$$= \frac{-Z}{A}\,[0{\cdot}00084] + 0{\cdot}008665 - f \text{ அ. நி.}$$

அலகுகளில்

$\frac{Z}{A}$-யின் சராசரி மதிப்பை 0·45 என்று கொண்டால்

$$\overline{B} = -0{\cdot}00038 + 0{\cdot}008665 - f$$

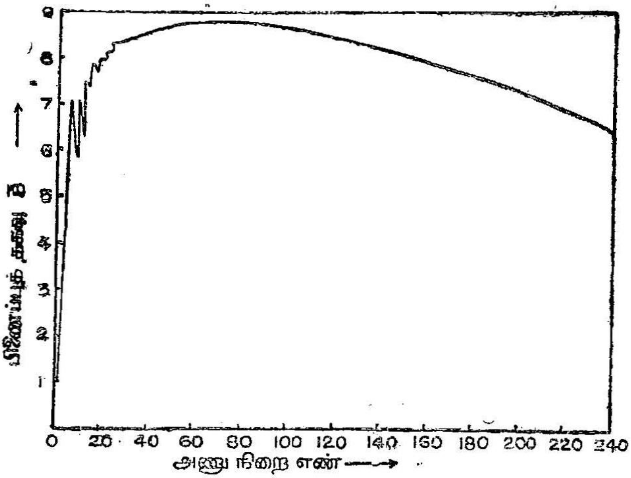
$$\overline{B} = 0{\cdot}0083 - f \qquad \ldots \quad (5{\cdot}11)$$

B என்பது கருவிலுள்ள துகள்களெல்லாம் பிணைவுறுதற்கு வேண்டிய ஆற்றல். *A* கருவிலுள்ள துகள்களின் எண்ணிக்கை. எனவே, பிணைப்புத் தகைவு ஒவ்வொரு துகள் அல்லது நியூக்ளியானின் சராசரி பிணைப்பு ஆற்றல் எனக்கொள்ளலாம்.

பிணைப்புத் தகைவு $\overline{B}$-ஐயும் அணு நிறை எண் *A*-ஐயும் இணைத்து வரையப்பட்ட வரைபடம், படம் (5·6)-ல் காட்டப் பட்டிருக்கிறது. இஃது நியூக்ளியான்கள் எந்த அளவிற்குப் பிணைக்கப்பட்டிருக்கின்றன என்பதை அறிய உதவுகின்றது.

வரைபடம் 5·6-லிருந்து கீழ்க்கண்ட உண்மைகளைப் பெற லாம்.

(அ) இலேசான (குறைந்த அணு எண் நிறை எண் உடைய) அணுக் கருக்களில் இப் பிணைப்புத் தகைவு *A*-ஐ ஒட்டிச் சீராக மாறவில்லை.



படம் 5·6.
கருக்களின் அணு நிறை எண் *A*-க்கும் அவற்றின் பிணைப்புத் தகைவு *B* இடையே வரையப்படும் வரை படம்

(ஆ) நடுத்தர அணு நிறை எண் கொண்ட அணுக் கருக்கள் எல்லாம் சுமார் 8·2 மி. எ. வோ. / நியூக்லியன் பிணைப்புத் தகைவைக் கொண்டிருக்கின்றன.

(இ) கனமான அணுக் கருக்களில் பிணைப்பு குறைந்து சுமார் 7·2 மி. எ. வோ./நியூக்லியான் ஆக மாறுகிறது.

இவ் வுண்மைகளைப் பின்வருமாறு விளக்கலாம் :

(அ) இலேசான கருக்களில் உள்ள நியூக்லியான்களில் பல கருவின் மேற்பரப்பில் தங்கிவிடுவதால், இவற்றிற்கும், கருவின் உள்ளடங்கி இருக்கும் துகள்களுக்கும் இடையே செயல்படும் பிணைப்பு விசை அதிக அளவு பிணைப்பைத் தருவதில்லை. இதன் காரணமாகப் பிணைப்பு ஆற்றல் குறைந்துவிடுகின்றது.

(ஆ) கனமான அணுக் கருக்களில் புரோட்டான்களின் எண்ணிக்கை அதிகமாக இருப்பதால் அவற்றிடையே செயல்படும் கூலும் விலக்கு விசையும் அதிகமாகிறது. இதன் காரணமாகக் கனமான தனிமங்களிலுள்ள கருக்களின் சராசரிப் பிணைப்பு ஆற்றல் அதிகமாகக் குறைகிறது.

கருவில் துகள்கள் எந்த அளவிற்குப் பிணைக்கப்பட்டிருக்கின்றன என்பதை அறிவது, அணுக்கரு விசைகளின் தன்மையை ஓரளவிற்கு அறிவதற்குப் பயன்படுகிறது. இதனைப் பின்னர்க் காண்போம்.

மாதிரிக் கணக்கு 5·1

கீழ்க்கண்ட அணுக் கருக்களின் பிணைப்பு ஆற்றலையும், பிணைப்புத் தகைவு அல்லது சராசரிப் பிணைப்பு ஆற்றல்/நியூக்லியான் ஆகியவற்றைக் கணக்கிடுக.

(i) $_{28}Ni^{64}$ (ii) $_{29}Cu^{64}$ (iii) $_{30}Zn^{64}$

இத்தகைய கணக்கீடுகளில் M_p-ன் மதிப்பை 1·008 அ. நி. அ. என்றும், M_n-ன் மதிப்பை 1·009 அ. நி. அ. என்றும் கொண்டால் போதுமானது.

(i) $_{28}Ni^{64}$ கருவிற்கு $(A—Z) = N = 36$, $Z = 28$ கருத்துகளின் மொத்த நிறை

$$= (A-Z)\,M_n + ZM_p$$
$$= 36 \times 1·009 + 28 \times 1·008$$
$$= 36·324 + 28·224$$
$$= 64·548 \text{ அ. நி. அ.}$$

கருவின் நிறை 63·928 அ. நி. அ. எனவே

$$\Delta M = 64·548 — 63·928$$
$$= 0·620 \text{ அ. நி. அ.}$$

ஆற்றல் அலகுகளில் 1 அணு நிறை அலகு = 932 மி. எ. வோ. எனவே பிணைப்பு ஆற்றல்

$$B = 0·620 \times 932 = 577·2 \text{ மி. எ. வோ.}$$

பிணைப்புத் தகைவு

$$\bar{B} = B/A = 577·2/64 = 9·02 \text{ மி. எ. வோ.}$$

(ii) $_{29}Cu^{64}$ கருவிற்கு $A-Z = 35$

கருத் துகள்களின் மொத்த நிறை

$$= (A-Z)\,M_n + ZM_p$$
$$= 35 \times 1·009 + 29 \times 1·008$$
$$= 64·547 \text{ அ. நி. அ.}$$

கருவின் நிறை $= 63 \cdot 9429$ அ. நி. அ.

$$\Delta M = 64 \cdot 547 - 63 \cdot 9429$$
$$= 0 \cdot 618 \text{ அ. நி. அ.}$$

எனவே பிணைப்பு ஆற்றல்

$$B = 0 \cdot 618 \times 932$$
$$= 575 \cdot 3 \text{ மி. எ. வோ.}$$

பிணைப்புத் தகைவு $\overline{B} = 575 \cdot 3/64 = 8 \cdot 98$ மி. எ. வோ.

(ii) $_{30}Zn^{64}$ கருவிற்கு $A - Z = 34.$ $Z = 30.$

கருத் துகள்களின் மொத்த நிறை

$$= (A - Z)\, Mn + Z \,.\, Mp$$
$$= 34 \times 1 \cdot 009 + 30 \times 1 \cdot 008$$
$$= 34 \cdot 306 + 30 \cdot 240$$
$$= 64 \cdot 546.$$

கருவின் நிறை $63 \cdot 929$ அ.நி.அ.

$$\therefore \quad \Delta M = 64 \cdot 546 - 63 \cdot 929$$
$$= 0 \cdot 617 \text{ அ.நி.அ.}$$

பிணைப்பு ஆற்றல் $B = 0 \cdot 617 \times 93 \cdot 2$
$= 574 \cdot 4$ மி.எ.வோ.

பிணைப்புத் தகைவு $\overline{B} = 574 \cdot 4/64$
$= 8 \cdot 97$ மி.எ.வோ.

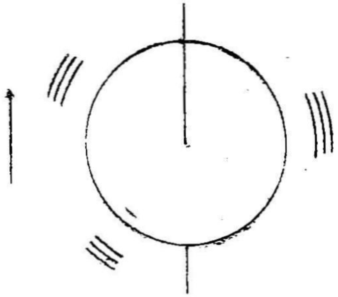
5·8. அணுக் கருவின் தற்சுழற்சிக் கோண உந்தம்

எலக்ட்ரான், புரோட்டான், நியூட்ரான் போன்ற துகள்களுக்கு நிறை, மின்னூட்டம் போன்ற பண்புகள் இருப்பது போலவே நேர்க்கோட்டு உந்தம் (Linear Momentum), கோண உந்தம் (Angular Momentum) போன்ற பண்புகளும் உள்ளன. இத் துகள்களின் நேர்க் கோட்டு உந்தங்களின் மதிப்பு எதுவாயினும், கோண உந்தங்கள், குவான்டம் கொள்கையின்படி, வரையறுக்கப்பட்ட மதிப்புகளில் ஒன்ருகத்தான் இருக்க முடியும்.

கருவின் அடிப்படைத் துகள்களான புரோட்டான்களும் நியூட்ரான்களும், எலக்ட்ரான்களைப் போலவே

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi}$$

எர்குகள் மதிப்புடைய ($h =$ பிளாங்கின் மாறிலி) கோண உந்தத்தைக் கொண்டு ஒரு குறிப்பிட்ட அச்சின்மீது படத்தில் (5·7) காட்டியவாறு சுழல்கின்றன எனக் கொள்ளலாம்.



படம் 5·7
துகள்களின் தற்சுழற்சி

குவான்டம் கொள்கையின்படி, ஓர் அடிப்படைத் துகளின் 'உள்ளுறை கோண உந்தம்' (intrinsic angular momentum) அதன் தற்சுழற்சி (spin) என அழைக்கப்படுகிறது. இதைக் கொண்டு உண்மையில் இத் துகள்கள் எல்லாம் தம்மைத் தாமே ஓர் அச்சின்மீது சுற்றிக்கொண்டிருக்கின்றன என்று கொள்வதற்கில்லை. இது குவான்டம் கொள்கையின்படி துகள் ஒன்றிற்கு இருக்கும் பண்பு ஆதலால், நடைமுறையில் அவை சுழற்சி கொண்டிருக்கின்றன என்று எடுத்துக் கொள்ளலாகாது.

புரோட்டான்கள், நியூட்ரான்கள் பிணைப்பினால் அணுக்கருக்கள் உண்டாகும்பொழுது எவ்வாறு அவை தம் பரிமாணத்தை இழப்பதில்லையோ, அவ்வாறே தம் தற்சுழற்சியையும் இழந்துவிடுவதில்லை. குவான்டம் கொள்கையின்படி தனித் துகளின் தற்சுழற்சி $0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, \hbar$ எர்குகள் ஆகியவற்றுள் ஒன்றாகத்தான் இருக்க முடியும். $h/2\pi = 1$ என எடுத்துக் கொண்டோமானால், புரோட்டான் நியூட்ரான் ஆகிய துகள்களுக்குத் தற்சுழற்சி $\frac{1}{2}$ ஆகிறது. வெளிப்புறக் காந்தப் புலத்தின் திசைக்கு இத் தற்சுழற்சி இணையாக இருந்தால் துகளின் தற்சுழற்சியின் மதிப்பு $+\frac{1}{2}$ என்றும், அத் திசைக்கு எதிர்த் திசையில் இருந்தால் $-\frac{1}{2}$ என்றும் கொள்ளலாம். இந்த அளவுகளைக் கொண்டு அமைதி நிலையில் உள்ள சில கருக்களின் தற்சுழற்சிகளைக் கணக்கிடலாம்.

அணுக் கருக்களின் தற்சுழற்சிக் கோண உந்தங்களைக் கோண உந்தத்தின் "வெளி குவான்டமாக்குதல்" (Space Quantisation) முறைகளை ஒட்டிய சோதனைகள் மூலம் கண்டுபிடிக்கலாம். கருக்களின் மொத்தக் கோண உந்தங்கள் கீழேயுள்ள அட்டவணையில் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன.

அட்டவணை 5·4

அணுக் கருக்களின் கோண உந்தங்கள்

எண்	A	Z	N	உறுதி நிலையில் உள்ள கருக்களின் எண்ணிக்கை	மொத்தக் கோண உந்தம்
1	ஒற்றைப் படை	ஒற்றைப் படை	இரட்டைப் படை	50	$\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2}, \frac{9}{2}$
2	ஒற்றைப் படை	இரட்டைப் படை	ஒற்றைப் படை	55	$\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2}, \frac{9}{2}$
3	இரட்டைப் படை	ஒற்றைப் படை	ஒற்றைப் படை	4	1, 2, 3, 4, 5,
4	இரட்டைப் படை	இரட்டைப் படை	இரட்டைப் படை	165	0

இந்த அட்டவணையிலிருந்து அமைதி நிலையிலுள்ள கருக்களில் பெரும்பாலானவை சுழிக் கோண உந்தத்தைப் பெற்றிருக்கின்றன என்பதை அறியலாம். இதிலிருந்து ஏறத்தாழக் கருக்களிலுள்ள தற்சுழற்சிகள் ஒன்றையொன்று சரியீடு செய்துகொள்வதற்கு முனைகின்றன எனவும் அறியலாம்.

5·9 அணுக்கருவின் மின்காந்தப் பண்புகள்

அணுக்கருவின் மின்னூட்டம் Ze, அதிலுள்ள Z புரோட்டான்களினால் கிடைக்கிறது எனவும், நியூட்ரான்களினால் கருவிற்கு மின்னூட்டம் கிடைப்பதில்லை எனவும் முன்னர்ப் பார்த்தோம். இப்பொழுது கருவிலுள்ள மின்னூட்டம் எவ்வாறு பரவியிருக்கிறது என்பதைப் பொறுத்து அதற்கு மற்றுமொரு பண்பை வரையறுக்கலாம். அனேக கருக்களில் மின்னூட்டம், கோளத்தில் சரிச்சீராக பரவியிருக்கவில்லை. இதனின்றும் எந்த அளவிற்கு மின்னூட்டம் மாறிப் பரவியிருக்கின்றது என்பதை அறியக் கருவிற்கு 'நான்கு முனைச் சுழல் திறன்' (Quadrupole moment) என்ற ஒரு பண்பு கொடுக்கப்பட்டிருக்கிறது.

மேலுள்ள கோண உந்தம் சுழியாக இல்லாமல் இருக்கும் அணுக் கருக்களெல்லாம் சிறிய காந்தங்கள்போல் உள்ளன என்று கொள்ளலாம். அதாவது, அவற்றிற்கு ஒரு காந்தச் சுழல் திறன் உண்டு எனக் கொள்ளலாம். கருக்கள் ஓரளவு காந்தச் சக்தியைப் பெற்றிருக்கலாம் என்பதை முதன் முதலாகப் பௌலி (Pauli) என்ற விஞ்ஞானி 1924ஆம் ஆண்டு யூகித்தார். அணு ஆற்றல் மட்டங்களில் ஏற்படுகின்ற "மீநுண் வரியமைப்பு" போல் கரு ஆற்றல் மட்டங்களிலும் "பெரும் மீநுண் வரியமைப்பு" (Fine structure) ஏற்படுகின்றது எனக் கொண்டு, கருக்களின் காந்தத் திருப்புத் திறன்களை அளக்க முடியும் என அவர் கூறினர். கருக்களின் கோண உந்தத்திற்கும் காந்த இரு முனைச் சுழல் திறனுக்குமிடையேயுள்ள தொடர்பை,

$$\text{இருமுனைக் காந்தச் சுழல் திறன் } \mu = \gamma I \qquad \dots \quad (5{\cdot}13)$$

என்ற சமன்பாட்டினால் அறியலாம். இச் சமன்பாட்டில் I என்பது கருவின் கோண உந்தத்தையும், γ என்பது ஒரு மாறிலியையும் குறிக்கும். இம் மாறிலி 'கைரோ காந்தத் தகைவு' (Gyro magnetic Ratio) எனப்படுகிறது. எடுத்துக்காட்டாகப் புரோட்டானுக்கு இம் மாறிலியின் மதிப்பு $0{\cdot}002\times10^{4}$ காஸ் – விநாடி (Gauss-Second) ஆகும்.

கருக்களின் இருமுனைக் காந்தச் சுழல் திறன்களை அளப்பதற்கு 'நியூக்லியர் மாக்னெட்டான்கள்' (Nuclear Magnetons) என்ற அலகுகள் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. 'போர் மாக்னெட்டான்கள்' அணுவின் இருமுனை காந்தச் சுழல்திறனை அளப்பதற்குப் பயன்படுவது போலவே, கருக்களின் காந்தச் சுழல் திறனை அளப்பதற்கு 'நியூக்லியர் மாக்னெட்டான்கள்' பயன்படுகின்றன.

ஒரு நியூக்லியர் மாக்னெட்டான்

$$\mu_{NM} = \frac{e^h}{4\pi M_p C} \quad \ldots \quad (5\cdot14)$$

இதில் e புரோட்டானின் மின்னூட்டத்தையும், h பிளாங்கின் மாறிலியையும், M_p புரோட்டானின் நிறையையும், C ஒளியின் திசைவேகத்தையும் குறிக்கின்றன.

$\mu_{NM} = 5\cdot04929 \times 10^{-24}$ எர்கு/காஸ்.

இது போர் மாக்னெட்டானின் 1/1836 பங்கு ஆகும்.

$$\mu_B \text{ (போர் மாக்னெட்டான்)} = \frac{e^h}{4\pi\, m_e E}$$

$$\mu_{NM} = \frac{e^h}{4\pi M_P C}$$

$$\therefore \quad \frac{\mu_{NM}}{\mu_B} = \frac{e^h}{4\pi M_p C} \times \frac{4\pi\, m_e C}{e^h} = \frac{m_e}{M_P}$$

அணுக் கருக்களின் இருமுனைக் காந்தத் திருப்புத்திறன் மிகச் சிறு மதிப்பு வாய்ந்ததாக உள்ளது. இவற்றின் மதிப்புகள் $-2\cdot1$ நியூக்லியர் மாக்னெட்டானிலிருந்து (He கருவிற்கானது) $5\cdot5$ NM வரை உள்ளன. (Sn^{115})

கருக்கள் எல்லாம் புரோட்டான்களையும் நியூட்ரான்களையும் கொண்டவையாதலால், தனித்தனியாகப் புரோட்டானும், நியூட்ரானும் எந்த அளவிற்குக் காந்தச்சுழல்திறனைப் பெற்றிருக்கின்றன என்பதை அறிந்துகொள்வது அவசியமாகிறது. புரோட்டானின் காந்தச் சுழல்திறன் $2\cdot79255 \pm 0\cdot00300$ ZN_m எனச் சோதனை மூலம் கண்டுபிடிக்கப்பட்டுள்ளது. ஆனால் கொள்கை மூலம் அதற்கு ஒரு நியூக்லியர் மாக்னெட்டான்தான் காந்தச் சுழல் திறனைக அமைய வேண்டும். இவ்வாறே நியூட்ரானின் காந்தச் சுழல் திறனும் கொள்கைக்கு மாறாக $-1\cdot91280 \pm 0\cdot00008$ நியூக்லியர் மாக்னெட்டான்களாக உள்ளது. இவை யிரண்டும் புரோட்டான், நியூட்ரான் ஆகியவற்றின் முரண்பட்ட காந்தச் சுழல் திறன்கள் (Anamulous) என்று வரையறுக்கப்படுகின்றன. இதைத் தவிர மின்னூட்டமற்ற நியூட்ரானுக்கு எவ்வாறு ஒரு காந்தச் சுழல்திறன் இருக்க முடியும் என்ற வினா எழுகின்றது. கருவின் தற்சுழற்சி வெக்டரின் எதிர்த்திசையில் உள்ளதால் ஏற்படுகிறதென்று விளக்கம் சொல்லலாம். இதனால் நியூட்ரான் என்ற துகள் நேர்மின்னேற்றம் கொண்ட ஒரு துகளின்மேல் எதிர் மின்னூட்டமுடைய மேகம் சூழ்ந்த கூட்டுத் துகள் என

யூகிக்க வழி உண்டாகின்றது. எனினும், நாம் இன்னும் நியூட்ரானை அடிப்படைத் துகள்களில் ஒன்றாகவே கருதுகிறோம்.

5·10. கருக்களின் நான்குமுனைச் சுழல்திறன்கள் (Quadrupole moments of nuclei)

ஒரு கருவின் நான்கு முனைச் சுழல் திறன்

$$Q = \frac{2}{5} Ze\,(a^2 - b^2)$$

என்ற சமன்பாட்டிலிருந்து கிடைக்கிறது. இதில் 'a' என்பது மின்னூட்டப் பங்கீட்டு நீள்கோளத்தின் (Ellipsoidal distribution of charges) பெரும அச்சில் பாதியையும், 'b' என்பது சிறும அச்சில் பாதியையும் குறிக்கின்றன. a-ன் மதிப்பு b–யை விட அதிகமாக இருந்தால் நான்கு முனைச் சுழல்திறன் நேர்க்குறி உடையதாகவும், சிறியதாக இருந்தால் (Q) எதிர்க்குறி உடையதாகவும் இருக்கின்றன. அணுக்கருக்களில் பெரும்பாலானவை நான்கு முனைச்சுழல் திறனைச் சுழியாகக் கொண்டவை.

5·11. அணுக்கரு விசைகள்

அணுக்கருவிலுள்ள துகள்கள் 'அணுக்கரு நிலையாற்றல் பள்ளத்தில்' (Nuclear potential well) ஒன்றாகப் பிணைக்கப்பட்டிருக்கின்றன என்று முன்பே நாம் பார்த்தோம். கருவில் நேர் மின்னூட்டமுடைய புரோட்டான்களின் எண்ணிக்கை அதிகமாக இருப்பதால், துகள்களைப் பிணைக்கும் விசைகள், புரோட்டான்களிடையே செயல்படும் கூலும் விலக்கு விசைகளைக் காட்டிலும் மிகக் கூடுதலானச் சக்தி வாய்ந்தவையாக இருக்க வேண்டும். கருவின் தன்மைகளை நன்கு அறிவதற்கு, இத்தகைய விசைகளின் பண்புகள் தெரிந்திருப்பது மிக அவசியம். ஆனால், இவ் விசை பற்றி மிக அதிகமாகத் தெரியவில்லை. இருப்பினும், பல சோதனைகளிலிருந்து அவற்றின் ஒரு சில தன்மைகளை மட்டும் அறிய முடிகின்றது. வேறு மூல விசைகளான ஈர்ப்பு விசைகள் (gravitational forces), கூலும் நிலைமின் விசைகள் (coulomb's electrostatic forces) இவற்றைப்பற்றி நாம் முன்பே அறிவோம். ஆனால், அணுக்கரு விசைகளைப்பற்றி நாம் இன்னும் முற்றிலும் அறியவில்லை. அவ் விசைகளின் தன்மைகளில் சிலவற்றை இங்குக் காண்போம்.

(அ) குறுநெடுக்கம் (Short Range)

அணுக்கரு விசைகள் மிகச்சிறிய நெடுக்கம் வாய்ந்தவை என அறியலாம். கருவின் ஆரத்திற்கு அப்பாற்பட்ட தொலைவுகளில்

இவ் விசை, கூலும் விசைகளைக் காட்டிலும் வலிமை குறைந்து இருக்கின்றன என்றும், ஆரம் அளவு தொலைவில் அவற்றைப் போன்று பன்மடங்கு வலிமை பெற்றவை என்றும் அறியலாம். குறுகிய தொலைவில் இவ் விசைகள் கூலும் விசைகளைச் செயலற்று விடச் செய்துவிடுகின்றன என்று சொன்னால் மிகையாகாது.

(ஆ) தெவிட்டிய நிலை

அணுக்கரு விசை செயல்பட ஆரம்பிக்கும் தொலைவு ஏறத்தாழ ஒரு பெர்மி ($1f = 10^{-13}$ செ.மீ) என்பதை மிகத் துல்லியமாகச் சோதனைகள் மூலம் அறியலாம். இதிலிருந்து பல நியூக்லியான்களைக் கொண்ட ஒரு கருவில் அடுத்தடுத்து இருக்கும் துகள்களுக்கிடையேதான் இவ் விசைகள் தொழிற்படுகின்றன என்பது புலனாகின்றது. இந்த உண்மையிலிருந்து பிணைப்புத் தகவு $\bar{B} = B/A$ ஏன் ஒரு மாறிலியாக உள்ளது என்பதை அறியக்கூடும். கருவில் உள்ள ஒவ்வொரு துகளும் மற்றத் துகள்களுடன் தம் ஈர்ப்பு விசையைப் பகிர்ந்துகொண்டால் பிணைப்பு ஆற்றலுக்குக் காரணமான அவ் விசை $A(A-1)$ (A = அணுநிறை எண்) அல்லது தோராயமாக A^2-ன் மதிப்பிற்கு நேர்விகிதத்தில் இருக்கும். எனவே, இப்பொழுது B/A^2 ஏறத்தாழ ஒரு மாறிலியாக இருக்கும். ஆனால், இவ் விசை அடுத்தடுத்திருக்கும் துகள்களோடு மட்டும் பகிர்ந்துகொள்ளப்படுமானால், அஃது A-க்கு நேர்விகிதத்தில் இருக்கும். அதாவது B/A ஒரு மாறிலியாக இருக்கும். சோதனைகள் மூலம் B/A ஒரு மாறிலி என்று நாம் அறியலாம். எனவே, இதிலிருந்து அணுக்கரு விசைகள் 'தெவிட்டிய நிலையில்' (Saturated) உள்ளன என்பது தெரிகின்றது.

(இ) மின்னூட்டச் சார்பற்ற தன்மை (Change Independence)

அணுக்கரு விசைகளின் மற்றுமொரு பண்பு அவற்றின் மின்னூட்டச் சார்பற்ற தன்மையாகும். அதாவது, இரண்டு நியூட்ரான்களுக்கிடையே செயல்படும் விசை இரண்டு புரோட்டான்கள் அல்லது ஒரு புரோட்டான், ஒரு நியூட்ரான் ஆகியவற்றிற்கு இடையே செயல்படும் விசைக்குச் சமமாக உள்ளது. இரு புரோட்டான்களுக்கு இடையே இவ் விசையைத் தவிர்த்துக் கூலும் விலக்கு விசையும் செயல்படுகிறது எனக் கொள்ளலாம். அணுக்கரு விசைகளின் மின்னூட்டச் சார்பற்ற தன்மையானது, "நியூட்ரான் – புரோட்டான் சிதறல்", "புரோட்டான் – புரோட்டான் சிதறல்" ஆகிய சோதனைகளிலிருந்து பெறப்படுகிறது. இரு புரோட்டான்களுக்கு இடையே தொழிற்படும் விசையிலிருந்து கூலும் விசையை நீக்கினால், புரோட்டான் – நியூட்ரான்

விசைக்குச் சமமானதாக உள்ளதென்பது சோதனைமூலம் உண்மைப்படுத்தப்பட்டிருக்கிறது.

அணுக்கரு விசையின் பண்புகளை நன்கு விளக்குவதற்கான அளவியல் சார்ந்த (Quantitative approach) கோட்பாட்டை இதுவரை ஒருவரும் கொடுக்கவில்லை எனலாம். இருப்பினும், 1937 ஆம் ஆண்டு யுகாவா (Yukawa) என்ற ஜப்பானிய இயற்பியல் வல்லுநர், கருத்துகள்களிடைச் செயல்படும் கரு விசை, ஒருவகைப் பரிமாற்றத்தின் (exchange) மூலம் உண்டாகலாம் என்று நினைத்தார். அதாவது, ஒரு கருவில் அடுத்தடுத்துள்ள ஒரு புரோட்டானுக்கும் ஒரு நியூட்ரானுக்கும் இடையில் தொடர்ந்து ஒருவகைத் துகள் பரிமாற்றம் செய்யப்படுகிறதென்றும், இதுவே அத் துகள்களுக்கிடையே செயல்படும் ஈர்ப்பு விசைக்குக் காரணமாக இருக்கக்கூடும் என்றும் அவர் நினைத்தார். இக் கோட்பாடானது, இரண்டு அணுக்களுக்கிடையில் எலக்ட்ரான் பரிமாற்றத்தினால் ஏற்படும் ஈர்ப்பு விசைக்கான கோட்பாட்டிற்கு இணையாக உள்ளது. கருத்துகள்களுக்கிடையே பரிமாற்றம் செய்யப்படும் துகளின் நிறையானது, எலக்ட்ரான் நிறையைப்போல் சுமார் 200 மடங்கு இருக்கவேண்டுமென்று யுகாவா கணக்கிட்டார். இரண்டு ஆண்டுகளுக்குப் பின்னர் மியூவான் (Muon) அல்லது μ-மீசான் (μ-Meson) எனப்படுகின்ற எலக்ட்ரான் நிறையைப் போன்று சுமார் 200 மடங்கு நிறையுள்ள துகள் ஒன்று கண்டுபிடிக்கப்பட்டது. கரு விசைக்குக் காரணமாக உள்ள துகள் இந்த மியூவானாக இருக்கலாம் என்ற ஐயம் எழுந்தது. ஆனால், 1947 ஆம் ஆண்டு எலக்ட்ரான் நிறையைப் போல் சுமார் 273 மடங்கு நிறையுடைய 'பையான்' (pion) அல்லது π-மீசான் (π-Meson) என்ற துகள் கண்டுபிடிக்கப்பட்டது. மியூவான்களைக் காட்டிலும் பையான்கள் கருக்களுடன் அதிக வலிமையுடன் செயலீடுகள் நிகழ்த்துவதால், கருத் துகள்களிடையே பையான்கள்தான் பரிமாற்றம் செய்யப்படக்கூடும் என்று முடிவுசெய்யப்பட்டது.

யுகாவா கோட்பாட்டின்படி புரோட்டான்களும், நியூட்ரான்களும் தனித்துகள்கள் அல்ல என்றும், அவற்றிற்கு ஒருவகை உள்ளமைப்பு இருக்கவேண்டுமென்றும் கருதவேண்டியிருக்கிறது. இதன்படி புரோட்டான் துகள் மின்னூட்டமற்ற ஒரு கருவையும், அதைச் சூழ்ந்த நேர்மின்னூட்டம் கொண்ட ஒரு மேகத்தையும் உடைய ஒரு கூட்டமைப்பாக இருக்கவேண்டும் என நினைக்கத் தோன்றுகிறது. இதைப் போலவே நியூட்ரான் துகளும் நேர்மின்னூட்டம் கொண்ட ஒரு கருவும் அதனைச்

சூழ்ந்த எதிர்மின்னூட்டம் கொண்ட மேகமும் உடைய ஒரு கூட்டமைப்பாக இருக்கலாம். மேலும் டிராக் (Dirac) கோட்பாட்டின்படி, எவ்வாறு மின்காந்த விசைகள் ∴போட்டான்களின் பரிமாற்றம்மூலம் தோன்றுகின்றனவோ, அவ்வாறே அணுக்கரு விசைகளும் கருத் துகள்களுக்கிடையே நிகழும் மீசான் பரிமாற்றம் மூலம் தோன்றலாம் என்று எதிர்பார்க்கப்படுகிறது.

புரோட்டானும் நியூட்ரானும் பிணைவுற்று இருப்பதன் காரணம், அவை மீசான் மேகத்தினைத் தமக்காகப் பறித்துக் கொள்ளும் துடிப்புதான் என யுகாவா கோட்பாடு கூறுகிறது. இம் மீசானின் பரிமாற்றம் நிகழும் விரைவைப் (Frequency) பின் வருமாறு கணக்கிடலாம்.

பிணைப்பு ஆற்றல் $E = \hbar\nu$

எனவே

$$\nu = \frac{\text{பிணைப்பு ஆற்றல்}}{h} \times 10^{23}/\text{வினாடி}$$

இதன்படி கருவில், நியூட்ரான் புரோட்டான்களிடையே இந்த மீசான் மேகம் வினாடிக்கு 10^{23} முறைகள் பரிமாற்றம் செய்யப்படுகின்றன என அறியலாம். இதனால்தான் கருவிசை மிக வலிமை வாய்ந்ததாகவும் மிக இறுக்கமானதாகவும் திகழ்கிறது என்பதையும் அறியலாம்.

யுகாவாவின் யூகம் இன்று உண்மையாக்கப்பட்டுவிட்டது. இதனை அடுத்து W. கெம்பர் என்ற ஆங்கிலேய இயற்பியல் வல்லுநர், புரோட்டான்—புரோட்டான், நியூட்ரான்—நியூட்ரான் விசைகளை விளக்க மேற்கூறிய மின்னூட்டம் பெற்ற துகள் பரிமாற்றம் பயன்படாது என்றும், மின்னூட்டம் அற்ற துகள் பரிமாற்றம் (π° மீசான்) தேவைப்படும் என்றும் கண்டார்.

சில அணுக் கருக்களின் பண்புகள் கீழே கொடுக்கப்பட்டுள்ளன.

5·12 அணுக்கரு மாதிரியமைப்புகள் (Models of the nucleus)

முன்னுரை

ஒரு பொருளின் உண்மையான உள்ளமைப்பு சரியாகத் தெரியாதபொழுது, அதற்கான ஒரு மாதிரியை அமைத்து, அதனின்றும் பல உண்மைகளைத் தெரிந்துகொள்ளலாம். அணுக் கருவில் உள்ள புரோட்டான்களும் நியூட்ரான்களும் அவற்

அட்டவணை 5·5

அணுக் கருக்களில் சிலவற்றின் பிணைப்பு ஆற்றல்கள்

குறியீடு	Z அணு எண்	A அ. நி. எ.	கிடைக்கும் விழுக்காடு	அணுநிறை வேறுபாடு M − A	பிணைப்பு ஆற்றல் B (மி. எ. வோ.)
n	*0*	*1*	*99·9849* to *99·9961*	...	....
H	*1*	*1*	...	*7·8252*	...
D	*1*	*2*	*0·0319—0·0151*	*14·1022*	*2·225*
T	*1*	*3*	---	*16·0494*	*8·482*
He	*2*	*3*	$\sim 10^{-5}$ to 10^{-4}	*16·0299*	*7·718*
...	...	...	...	...	...
...	...	....	...	...	...
O	*8*	*16*	*99·759*	*−5·085*	*127·62*
...	...	...	...	...	...
...	....	...	...	...	...
Kr	*36*	*78*	*0·354*	*−79·63*	*675·6*

...	...	80	2·27	−83·61	695·4
...	...	82	11·56	−86·52	714·3
...	...	83	11·55	−85·87	721·7
...	...	84	56·90	−88·50	732·2
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
Hg	47	107	51·35	−95·03	915·4
...	...	109	48·65	−95·30	931·8
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
Au	79	197	100	−33·45	1559·4
Hg	80	196	0·146	−34·18	1551·2
...	...	198	10·02	−33·23	1556·5
...	...	199	16·84	−31·74	573·2

றிடையே தொழிற்படும் கரு விசையின் காரணமாக எவ்வாறு இயங்குகின்றன என்பதை அறிவதிலிருந்து கருக்களின் பல தன்மைகளைப் பெறமுடியும். எவ்வாறு பல எலக்ட்ரான்கள் அடங்கிய அணுக்களுக்கு மாதிரி அமைப்புகள் ஏற்படுத்தப்பட்டனவோ, அவ்வாறே அணுக்களுக்கும் மாதிரி அமைப்புகள் அமைக்கப்பட்டன. பல மாதிரியமைப்புகள் கருவிற்கு நிறுவப்பட்டபோதிலும், ஒன்றிலுைம் கருக்களின் எல்லா பண்புகளையும் விளக்க முடியவில்லை. கருக்களின் சில மாதிரியமைப்புகள் சில பண்புகளையும், மற்ற அமைப்புகள் வேறுசில பண்புகளையுமே விளக்குகின்றன. இவை நடைமுறையில் வெவ்வேறு கோட்பாடுகளைக் கொண்டு அமைக்கப்பட்டிருக்கின்றன.

கருக்களின் தன்மைகளை விளக்குவதற்குப் பல மாதிரியமைப்புகள் தரப்பட்டுள்ளன. அவற்றுள் முக்கியமானவை இரண்டு.

1. திரவத்துளி மாதிரியமைப்பு (liquid drop model)
2. கூடு மாதிரியமைப்பு (shell model)

முதல் மாதிரியமைப்பில் புரோட்டான்களும் நியூட்ரான்களும் கரு விசையின் காரணமாகச் சேர்ந்து இயங்குகின்றன என்றும், இரண்டாவது மாதிரியமைப்பில் கருத் துகள்கள் அவற்றின் ஆற்றலைப் பொறுத்து வெவ்வேறு கூடுகளில் தனித்தனியாக இயங்குகின்றன என்றும் எண்ணலாம்.

5·13 திரவத்துளி மாதிரியமைப்பு

பெரும்பாலும் எல்லாத் திரவங்களும் ஒரே அளவு அடர்த்தியைக் கொண்டிருக்கின்றன. இதைப் போலவே அணுக்கருக்களெல்லாம்கூட ஏறத்தாழ ஒரே அடர்த்தியைக் கொண்டிருக்கின்றன என்று 'நீல்ஸ் போர்' (Neils Bohr) விளக்கினுர். எனவே, அவர் ஓர் அணுக்கருவைத் திரவத்துளி ஒன்றோடு ஒப்பிட்டுப் பார்த்து அதனின்றும் கருக்களின் தன்மைகளை ஆராய முற்பட்டார்.

ஓர் அணுக்கருவிற்கும் திரவத்துளி ஒன்றிற்கும் உள்ள ஒற்றுமைகள்.

(அ) எல்லா அணுக்கருக்களும் திரவங்களைப்போல் ஒரே அடர்த்தியைக் கொண்டிருக்கின்றன.

(ஆ) கருக்களின் பிணைப்பு ஆற்றல்/நியூக்லியான், திரவங்களின் ஆவியாதலின் உள்ளுறை வெப்பத்திற்கு ஒப்ப இருக்கிறது.

(இ) கருக்களின் கதிரியக்கத் தேய்வு, திரவத்துளி ஆவியாக மாறுவது போல உள்ளது. அதாவது திரவத்துளி மூலக்கூறுகளின் உள்ளிட்ட வெப்ப அதிர்வுகளின் ஆற்றல், கருக்களின் ஆற்றலுக்கு ஒப்ப உள்ளது.

(ஈ) ஆவியினின்றும் திரவம் துளியாக மாறுவது, தன்னுள் செலுத்தப்படும் துகளுடன் சேர்ந்து, கரு, ஒரு கூட்டுக் கருவாக மாறுவதற்கு ஒப்ப இருக்கிறது.

இக் காரணங்களினால் கருவொன்றிற்குத் திரவத்துளி போன்ற ஒரு மாதிரியமைப்பைக் கொடுக்க இயலுமா என ஒரு வினா பிறக்கிறது. திரவத்துளி மூலக் கூறுகளிடையே தொழிற்படும் விசை அடுத்தடுத்து இருக்கின்ற ஒரு சில மூலக்கூறுகளிடையேதான் தொழிற்படும் என்றும், தொலைவில் உள்ள மூலக்கூறுகள் அதிக விசையுடன் ஈர்க்கப்படுவதில்லை என்றும் நாம் 'லாப்லாஸ்' கோட்பாடுகளினின்றும் (Laplace's Hypotheses) அறியலாம். இவ்வாறே, கருவிலும் அடுத்துள்ள கருத்துகள்களுக்கிடையே தான் கருவிசை தொழிற்படுகிறது எனலாம். கோள வடிவமுள்ள ஒரு திரவத்துளியின் வெளிப்பரப்பில் உள்ள மூலக்கூறுகளிடையே செயல்படும் ஈர்ப்பு விசை, உள்ளடங்கிய மூலக் கூறுகளிடையே செயல்படும் ஈர்ப்பு விசையைவிடக் குறைவாக இருப்பதால், திரவங்களின் மேற்பரப்பில் ஒரு பரப்பு இழுவிசை (Surface Tension) ஏற்படுகிறது. அவ்வாறே கருவின் வெளிப் பரப்பிலுள்ள நியூக்லியான்களிடையே செயல்படும் விசையைக் காட்டிலும் உள்ளடங்கிய துகள்களிடையே செயல்படும் விசை அதிகமாக உள்ளதால் கருவின் மேற்பரப்பில் ஒருவித பரப்பு விசை (Surface force) தொழிற்படுகிறது எனலாம்.

கரு ஒன்றை ஒரு திரவத் துளியோடு ஒப்பிட்டுப் பார்த்து அதன் பிணைப்பு ஆற்றலைக் கணிக்கலாம்.

பல கருத் துகள்களின் பிணைப்பினால் ஏற்படும் முழுக்கருவின் நிறையும் அது உண்டாவதற்குக் காரணமான புரோட்டான்கள், நியூட்ரான்கள் ஆகியவற்றின் நிகர நிறையும் சமமல்ல என்பதை நாம் முன்பே பார்த்தோம். இவ் விரண்டிற்கும் உள்ள வேறுபாடு கருத் துகள்களைப் பிணைப்பதற்குச் செலவழிக்கப்படுகிறது என்றும் கண்டோம். அதாவது அணு எண் Z அணு நிறை எண் A கொண்ட கருவின் நிறையான

$$M(Z,A) < Z\cdot M_p+(A-Z)M_n \quad \ldots \quad (6\cdot 15)$$

ஆகும்.

இதில் M_p, M_n ஆகியவை முறையே புரோட்டான், நியூட்ரான் துகள்களின் நிறைகள். மேற்கண்ட கோவையை

$$M(Z, A) = Z\ M_p+(A-Z)M_n-B \qquad \ldots \quad (5\cdot16)$$

என்றும் எழுதலாம். இங்கு B என்பது கருவின் பிணைப்பு ஆற்றலைக் குறிக்கும். இதனைச் சற்றே மாற்றி எழுதும்போது,

$$B = Z\cdot M_p+(A-Z)M_n-M(Z,A) \qquad \ldots \quad (5\cdot17)$$

இது கருவின் பிணைப்பு ஆற்றலைக் குறிக்கிறது.

திரவத் துளி மாதிரியமைப்பினைக் கொண்டு ஒரு கருவின் பிணைப்பு ஆற்றலுக்கான கோவையைக் கீழ்க்கண்டவாறு தருவிக்கலாம்.

(அ) கருத் துகள்களிடையே தொழிற்படும் கருவிசை குறு நெடுக்கமுடையதாக இருப்பதாலும், கருவின் அடர்த்தி ஒரு மாறிலியாக இருப்பதாலும், அதன் பிணைப்புக்குக் கிடைக்கும் ஆற்றல் கருவிலுள்ள நியூக்லியான்களின் எண்ணிக்கைக்கு நேர் விகிதத்தில் இருப்பதாகக் கொண்டால், அது கருவின் கன பரிமாணத்திற்கு நேர் விகிதத்தில் இருக்கும். இதை நாம் 'பரிமாண ஆற்றல்' (Volume Energy) என்றழைக்கலாம்.

எனவே, பரிமாண ஆற்றல்

$$\propto \text{கருவின் கன பரிமாணம்}$$

$$\propto \tfrac{4}{3}\pi R^3$$

இங்கு R என்பது கருவின் ஆரத்தைக் குறிக்கும்.

ஆனல் $R = \gamma_0 A^{\frac{1}{3}}$ (γ_0—ஒரு மாறிலி)

எனவே பரிமாண ஆற்றல் $\propto \tfrac{4}{3}\pi (A^{\frac{1}{3}})^3\, \gamma_0{}^3$

$$\propto \tfrac{4}{3}\pi A\, \gamma_0{}^3$$

$$= \text{மாறிலி} \times A$$

$$= +\,a_1\ A \qquad \ldots \quad (5\cdot18)$$

இங்கு a_1 என்பது ஒரு மாறிலி. நேர்க்குறி கருக்களின் ஈர்ப்பு விசையைக் குறிக்கிறது.

(ஆ) இரண்டாவது தொடர் (Expression) கருவின் திரவத் துளி மாதிரியமைப்பிலிருந்து நேரடியாகப் பெறப்படுகிறது. முன்பு கண்டவாறு கரு ஒன்று திரவத்துளி ஒன்ரேடு ஒப்புமை உடையதால், கருவின் மேற்பரப்பில் இருக்கும் துகள்கள் உள்ள

டங்கிய துகள்களைவிடக் குறைந்த விசையோடு பிணைக்கப்பட்டிருக்கும். இக் காரணத்தால் கருவின் பிணைப்பு சிறிது நெகிழ்கிறது எனலாம். இந் நெகிழ்வு கோள வடிவத்தில் உள்ள கருவின் பரப்பைப் பொறுத்திருக்கிறது. இதனைப் 'பரப்பு ஆற்றல்' (Surface Energe) என்கின்றனர்.

$$\text{பரப்பு ஆற்றல்} \quad \alpha \ \text{கோள வடிவக் கருவின் பரப்பு}$$

$$\alpha \ 4\pi R^2$$

$$\alpha \ 4\pi(\gamma_0 \ A^{\frac{1}{3}})^2$$

$$\alpha \ 4\pi\gamma_0^2 \ A^{\frac{2}{3}}$$

$$= \text{மாறிலி} \times A^{\frac{2}{3}}$$

$$= -a_2 \ A^{\frac{2}{3}} \qquad \ldots \quad (5{\cdot}19)$$

a_2 என்பது ஒரு மாறிலி. எதிர்க்குறி பிணைப்பு நெகிழ்வைக் குறிக்கிறது.

(இ) கருவிலுள்ள Z புரோட்டான்களிடையே தோழிற்படும் கூலும் விலக்கு விசை (நிலைமின் விசை) கருவின் பிணைப்பு ஆற்றலைக் குறைக்கிறது. இவ் வெதிர்ப்பு ஆற்றல் கருவிலுள்ள புரோட்டான்களின் நிலையாற்றலுக்கு நேர் விகிதத்தில் இருக்கிறது. இதைக் "கூலும் ஆற்றல்" எனலாம்.

$$\text{கூலும் ஆற்றல்} \quad \alpha \left(\frac{Ze}{R}\right)^2$$

$$\alpha \ Z^2 e^2 / R$$

$$\alpha \ Z^2 e^2 / \gamma_0 \ A^{\frac{1}{3}}$$

$$\alpha \left(\frac{e^2}{\gamma_0}\right) Z^2 \ A^{-\frac{1}{3}}$$

$$= \text{மாறிலி}. \ Z^2 \ A^{-\frac{1}{3}}$$

$$= -a_3 \cdot Z^2 \ A^{-\frac{1}{3}} \qquad \ldots \quad (5{\cdot}20)$$

a_3 என்பது மற்றொரு மாறிலி. எதிர்க்குறி கூலும் விலக்கு விசையினால் ஏற்படும் பிணைப்பு நெகிழ்வைக் குறிக்கிறது.

(ஈ) நான்காம் தொடர் முதன் முதலாக 'ஃபெர்மி' என்ற விஞ்ஞானியால் கண்டுபிடிக்கப்பட்டது. இது கருவில் புரோட்டான்களும் நியூட்ரான்களும் எவ்வாறு பரவலாக உள்ளன என்பதைப் பொறுத்து அமைகிறது. இதனைச் ஃபெர்மி

$$\frac{-a_4(Z-A/_2)^2}{A}$$

என்று கணக்கிட்டார். a_4 என்பது ஒரு மாறிலியாகும். எதிர்க்குறி பிணைப்பு நெகிழ்வைக் குறிக்கிறது. இது 'எதிர்ச் சீர் ஆற்றல்' (Assymmetry energy) என்று அழைக்கப்படுகிறது. பிணைப்பை நெகிழ்விக்கும் இத் தொடர் புரோட்டான்களின் எண்ணிக்கையைக் காட்டிலும் நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கை எந்த அளவிற்கு அதிகமாக இருக்கிறது என்பதைப் பொறுத்தது என அவர் கண்டார். $A = Z$ என்றிருந்தால் (கருவில் புரோட்டான்களின் எண்ணிக்கையும் நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கையும் சமமாக இருந்தால்) இத் தொடரின் மதிப்பு சுழியாகிறது.

$$\text{எதிர்ச்சீர் ஆற்றல்} = \frac{-a_4\,(Z-A/_2)^2}{A} \qquad \ldots \quad (5{\cdot}21)$$

(உ) இவற்றைத் தவிர, கருக்களின் உறுதி நிலைக்குரிய காரணங்களை ஒட்டி மற்றொரு தொடர் கிடைக்கிறது. சாதாரணமாகக் கருவிலுள்ள நியூக்லியான்களின் எண்ணிக்கை இரட்டைப் படையாக (even) இருந்தால் அதன் பிணைப்பு அதிகமாக இருக்கிறது. ஒரு சில கருக்களில் நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கையும், புரோட்டான்களின் எண்ணிக்கையும் இரட்டைப்படையாக உள்ளன. இவை இரட்டைக் கருக்கள் என அழைக்கப்படுகின்றன (even—even nuclei), இவை மற்றக் கருக்களைக் காட்டிலும் மிக உறுதியாகப் பிணைக்கப்பட்டிருக்கின்றன. காட்டாக, $_2He^4$, $_6C^{12}$, $_8O^{16}$ முதலிய இரட்டை–இரட்டைக் கருக்கள் அதிகப் பிணைப்பாற்றல் கொண்டிருக்கின்றன. கருவில் புரோட்டான்களின் எண்ணிக்கையும், நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கையும் ஒற்றைப் படையாகவும், மொத்தத் துகள்களின் எண்ணிக்கை இரட்டைப் படையாகவும் இருக்கும் கருக்கள் ஒற்றை—ஒற்றை கருக்கள் (odd-odd nuclei) எனப்படுகின்றன. இவ்வாறே புரோட்டான்களின் எண்ணிக்கையோ நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கையோ ஒற்றைப் படையாக இருந்து, மொத்த நியூக்லியான்களின் எண்ணிக்கை ஒற்றைப்படையாக இருப்பின், இவ்வகைக் கருக்கள் ஒற்றைப்படை A கருக்கள் என அழைக்கப்படுகின்றன. இவற்றில் இரட்டை—இரட்டைக் கருக்கள் மிக அதிக உறுதி

நிலையிலும், ஒற்றை—ஒற்றைக் கருக்கள் அவற்றைவிட ஒரு சிறிது குறைந்த உறுதி நிலையிலும், ஒற்றைப்படை A கருக்கள் ஏறத்தாழ உறுதியற்ற நிலையிலும் இருப்பதால் கருக்களின் உறுதி நிலையைப் (Stability) பொறுத்து பிணைப்பு ஆற்றலுக்கு ஒரு தொடர் கிடைக்கிறது. இஃது "இணையாக்கல் ஆற்றல்" (Pairing Energy) எனப்படுகிறது. இது δ என்றிருந்தால்,

$\delta = O$, N இரட்டைப்படை, Z ஒற்றைப்படை ⎫ A ஒற்றைப் படை
N ஒற்றைப்படை, Z இரட்டைப்படை ⎭

$= +\dfrac{a_5}{A^{\frac{3}{4}}}$, N இரட்டைப்படை, Z இரட்டைப்படை, A இரட்டைப்படை

$= -\dfrac{a_5}{A^{\frac{3}{4}}}$, N ஒற்றைப்படை, Z ஒற்றைப்படை, A இரட்டைப்படை

இங்கு a_5 என்பது ஒரு மாறிலி. இத் தொடர்களை யெல்லாம் ஒன்று சேர்த்துத் திரவத்துளி மாதிரியின் அடிப்படையில், ஓர் அணுக் கருவின் பிணைப்பு ஆற்றலுக்கு ஒரு கோவை பெறலாம்.

பிணைப்பு ஆற்றல்

$$B = a_1 A - a_2 A^{\frac{2}{3}} - a_3 Z^2 A^{-\frac{1}{3}} - a_4 \frac{\left(Z - \frac{A}{2}\right)^2}{A} \pm \delta \quad \ldots (5{\cdot}22)$$

a_1 முதல் a_5 வரை உள்ள ஐந்து மாறிலிகளின் மதிப்புகள் சோதனைகள் மூலம் கிடைத்த கரு இயல்புகளினின்றும், அணுக்கருச் செயலீடுகளினின்றும் கிடைத்த மதிப்பீடுகளைச் மேற் கண்ட கோவையில் பொருத்திக் கண்டுபிடிக்கப்பட்டன. இவை முறையே,

$a_1 = 15{\cdot}753$ மி. எ. வோ.
$a_2 = 17{\cdot}800$ மி. எ. வோ.
$a_3 = 0{\cdot}7103$ மி. எ. வோ.
$a_4 = 94{\cdot}77$ மி. எ. வோ.
$a_5 = 33{\cdot}6$ மி. எ. வோ.

எனவே, பிணைப்பாற்றலுக்கான தொடர்க் கோவையைக் (சமன்பாடு 4—21) கீழ்க்கண்டவாறு எழுதலாம்.

$$B = 15{\cdot}753A - 17{\cdot}80A^{2/3} - 0{\cdot}713\, Z^2 A^{-\frac{1}{3}}$$

$$- 94{\cdot}77\,\frac{(Z - A/_2)^2}{A} \pm \delta \qquad \ldots \quad (5{\cdot}23)$$

δ-ன் மதிப்பு முன்பு கொடுக்கப்பட்டது. அணு எண் Z, அணு நிறை எண் A கொண்ட அணுக்கருவின் நிறையை அதன் பிணைப்பு ஆற்றலின் மதிப்பைக் கொண்டு பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$M(Z, A) = Z \cdot Mp + (A - Z)M_n - B. \qquad \ldots \quad (5{\cdot}24)$$

ஹைடிரஜன், நியூட்ரான் ஆகியவற்றின் தெரிந்த நிறைகளுடன் B-ன் மதிப்பை அணுநிறை அலகுகள் கொண்டு எழுதும் பொழுது

$$M(Z,A) = 0{\cdot}99175\, A - 0{\cdot}000840\, Z + 0{\cdot}019114\, A^{2/3}$$

$$+ 0{\cdot}0007626\, Z^2 A^{-\frac{1}{3}} + 0{\cdot}101750\,(Z - A/_2)^2 A^{-1} - \delta \qquad (5{\cdot}25)$$

இங்கு $\delta = \pm\, 0{\cdot}036/A^{3/4}$ அல்லது சுழி $\qquad \ldots \quad (5{\cdot}26)$

இக் கோவையை முதன்முதலாக வைஸாக்கர் என்ற ஜெர்மானிய விஞ்ஞானி தருவித்ததால், இது 'வைஸாக்கரின் நிறைக் கோவை' (Weizäcker's mass formula) என்றழைக்கப்படுகிறது. இந்தக் கோவையில் உள்ள குணகங்கள் எல்லாம் c^{12} நிறை அளவுகளில் பெறப்பட்டிருக்கின்றன.

நிறைநிரல்மானிகளைக் கொண்டு அளக்கப்படும் கருக்களின் நிறைகளிலிருந்து கிடைக்கும் பிணைப்புத் தகைவும் மேற்கண்ட கோவையிலிருந்து கணிக்கப்படும் நிறைகளிலிருந்து கிடைக்கின்ற பிணைப்புத் தகைவும் அட்டவணை 5·6-ல் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன. இவை ஏறத்தாழச் சமமாக இருப்பதைக் காண்கின்றோம்.

அணுக்கருவின் திரவத்துளி மாதிரி அமைப்பினின்று மேற்கண்டவாறு கருக்களின் நிறைகளைக் கணிக்கலாம். இதைத் தவிரக் கதிரியக்கமுடைய ஒரு கரு α-துகள் உமிழியா அல்லது β-துகள் உமிழியா என்றும் இம்மாதிரி அமைப்பினின்றும் அறியமுடியும். காட்டாக $_{92}U^{238}$ கரு β-உமிழியா அல்லது α-உமிழியா என்பதைக் கீழ்க்கண்டவாறு அறியலாம்.

அட்டவணை 5·6

அணுக்கரு	பிணைப்பு ஆற்றல்/ நியூக்லியான் மி. எ. வோ.	அளக்கப் பட்டது மி. எ. வோ.
$_{8}O^{17}$	8·11	7·75
$_{13}Al^{27}$	8·42	8·33
$_{16}S^{33}$	8·58	8·50
$_{25}Mn^{55}$	8·74	8·75
$_{29}Cu^{63}$	8·75	8·75
Mo^{98}	8·62	8 63
$_{53}I^{127}$	8·37	8·43
$_{78}Pt^{195}$	7·90	7·92
$_{92}U^{238}$	7 56	7 58
$_{97}Bk^{245}$	7·54	7 52

நிறைக்கோவையைப் பயன்படுத்திக் கணிக்கப்பட்ட கருக்களின் நிறைகளைச் சோதனைமூலம் அளக்கப்பட்ட நிறைகளோடு ஒப்பிட்டுப் பார்த்தல்.

$_{92}U^{238}$ கருவிலிருந்து β துகள் உமிழப்படுமானால்,

$$_{92}U^{238} \longrightarrow {}_{93}Np^{238} + {}_{-1}e^{0}$$

$$M(Z,A) = M(92, 238) = M(93, 238) + me$$

மேற்கண்ட சமன்பாட்டில், இடது பக்கத்திலுள்ள கரு, துகள் ஆகியவற்றின் நிறை வலது பக்கத்திலிருக்கும் கருவின் நிறையை விட அதிகமாக இருப்பதால் $_{92}U^{238}$ கருவிலிருந்து β-துகள் வெளியேற முடியாது. (β துகளின் அமைதிநிலை நிறை = 0 511 மி. எ. வோ.) ஆனால் α-கதிரியக்கத்தில்

$$_{92}U^{238} \longrightarrow {}_{90}Th^{234} + {}_{2}He^{4} \quad (\alpha\text{-துகள்})$$

A, *Z*-ன் மதிப்புகளை மேற்கண்ட சமன்பாட்டில் சரியீடு செய்து பார்க்கும்போது, $M(92,238)$, $M(90,234)+\alpha$ துகள், ஆகியவற்றின் நிறையைவிட 0 004 அ. நி. அ. அல்லது 3·8 மி. எ. வோ.

அதிகமாக உள்ளது. எனவே, U^{238} கரு கதிரியக்கத்தினல் Th^{234} கருவாக மாறமுடியுமென்பது தெளிவாகின்றது.

இவற்றைத் தவிர, அணுக் கருப் பிளவுச் செயலீட்டை, மற்றக் கரு மாதிரி அமைப்புகளைவிடத் திரவத் துளி மாதிரி அமைப்பு நன்கு விளக்குகிறது. இதனைப் பின்னர்க் காண்போம்.

5·14 கூடு மாதிரி அமைப்பு

அணுவில் இருக்கும் எலக்ட்ரான்கள் அதன் மையத்தில் இருக்கும் கருவினல் ஈர்க்கப்படுவதனுல் ஒருமைய விசையை (central forces) ஒட்டி இயங்குகின்றன என்றும், அவற்றின் ஆற்றல் கோண உந்தம் இவற்றை ஒட்டி அவை எவ்வாறு கூடு களில் அமைக்கப்பட்டிருக்கின்றன என்றும் நாம் அறிவோம். அதாவது அணுவிற்கு ஒரு கூடு மாதிரியமைப்பு அமைக்கப்பட்டு, வெவ்வேறு கூடுகளில் வெவ்வேறு எண்ணிக்கை கொண்ட எலக்ட்ரான்கள் நிலவுகின்றன என்றும் நாம் நினைக்க இடமிருக் கிறது. அதுபோல அணுக்கருவிலுள்ள துகள்களும் அவற்றின் மின்னூட்டம், கோண உந்தம் இவற்றிற்கேற்ப வெவ்வேறு கூடு களில் பொருத்தப்பட்டு ஒரு கூடு மாதிரியமைப்பு ஏற்படுத்த முடியுமா என ஆராயப்பட்டது. அணுவிலுள்ள எலக்ட்ரான்கள் மைய விசையினல் உந்தப்படுவதால், அணுவிற்குக் கூடு மாதிரி அமைப்பு கற்பனை செய்வது எளிதாகிறது. ஆனல், கருவிலுள்ள துகள்களைப் பிணைக்கும் விசையினை ஒரு மைய விசை என்று சொல்வது பொருத்தமாக இராது எனினும் கருத் துகள்களில் ஒன்று மற்றத் துகள்களினல் ஒரு விசையினல் ஈர்க்கப்படுகின்ற தென்று கொண்டு, நியூட்ரான்களும் புரோட்டான்களும் மைய விசையினல் உந்தப்படுகிறதென்று கொள்ளலாம் என்று நினைக்கப்படுகிறது. இதன் அடிப்படையில் புரோட்டான்களும், நியூட்ரான்களும் அவற்றின் ஆற்றல் கோண உந்தம் இவற்றை யொட்டி வெவ்வேறு கூடுகளில் இயங்கலாம் என நினைக்க வழி இருக்கின்றது. அணுவிலுள்ள எலக்ட்ரான்கள் ஒரே வகையின வாகையால் அவற்றிற்கு ஒரே வகைக் கூடுதான் பொருந்தும். ஆனல், நியூக்லியான்கள் இரண்டு வகையாக இருப்பதால் புரோட்டான்கள், நியூட்ரான்கள் ஆகியவற்றிற்குத் தனித் தனி யாக இரண்டு வகைக் கூடுகளை அமைக்கலாம்.

சில அணுக் கருக்கள் மற்றவற்றைக் காட்டிலும் அதிக உறுதி நிலை கொண்டுள்ளன. காட்டாக, கருவில் உள்ள புரோட்டான் களின் எண்ணிக்கையோ அல்லது நியூட்ரான்களின் எண்ணிக் கையோ 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, 152 என்ற எண்களில் ஒன்ருக

அலைவி n	வட்டப்பாதைக் குவாண்டம் எண் ℓ	மொத்தக் கோண உந்தம் J = ℓ ± ½	2J+1 ஆற்றல் மட்டத்திலுள்ள நியூக்லியான் எண்ணிக்கை	அணுக் கருவில் உள்ள மொத்த நியூக்லியான் எண்ணிக்கை
1	0	½	2	2
2	1	3/2	4	
		½	2	8
3	2	5/2	6	
		3/2	4	
	0	½	2	20
4	3	7/2	8	28
		5/2	6	
	1	3/2	4	
		½	2	
5	4	9/2	10	50
		7/2	8	
	2	5/2	6	
		3/2	4	
	0	½	2	
6	5	11/2	12	82
		9/2	10	
	3	7/2	8	
		5/2	6	
	1	3/2	4	
		½	2	
7	6	13/2	14	126
		11/2	12	
	4	9/2	10	
		7/2	8	
	2	5/2	6	
		3/2	4	
	0	½	2	

படம் 5·8. தற்சுழற்சி — வட்டப்பாதை மாய எண்களைத் தருவிக்கல்

இருந்தால் அக் கரு அதிக உறுதி நிலையுடையதாய் இருக்கிறது என்று கண்டுபிடிக்கப்பட்டுள்ளது. $_{1}O^{16}$, $_{20}Ca^{40}$, $_{50}Sn^{18}$, $_{82}Pb^{208}$ கருக்கள் பூமியின் மேற்பரப்புகளிலும், விண்மீன் கற்களிலும் அதிக அளவில் கிடைக்கின்றன என்று ஐயமற அறிவிக்கப்பட்டுள்ளது. மேலும் 50 புரோட்டான்கள் கொண்ட வெள்ளீயம் பத்து ஐசோடோப்புகளையும், 20 புரோட்டான்களைக் கொண்ட கால்சியம் ஆறு ஐசோடோப்புகளையும் கொண்டுள்ளது. இதைத் தவிரக் கருக்களின் நான்கு முனைத் திருப்புத் திறன்களும் மேற் கண்ட எண்ணுடைய நியூக்லியான்கள் கொண்ட அணுக் கருக்களில் அதிக அளவு உள்ளன. இதனால், இவ் வெண்கள் "மாய எண்கள்" (magic numbers) என்றழைக்கப்பட்டன.

அணுவில் உள்ள எலக்ட்ரான்களின் ஆற்றல்களைக் குறிப்பதற்கு முறையே முதன்மைக் குவான்ட எண் (n), வட்டப்பாதைக் கோண உந்த குவான்ட எண் (l) ஆகியவை கொடுக்கப்பட்டது போலவே, நியூக்லியான்களின் ஆற்றல்களைக் குறிப்பதற்கு n, l என்ற எண்கள் கொடுக்கப்பட்டன. 'n' என்பது கருத் துகள்களின் ஆற்றல் அதிகரிப்பைக் குறிப்பதற்கும் 'l' என்பது அத் துகள்களின் வட்டப் பாதைக் கோண உந்தங்களைக் குறிப்பதற்கும் பயன்படுத்தப்பட்டன.

மேற்கண்ட மாய எண்களின் மதிப்பை *M. G.* மேயர், *J.H.D.* ஜென்சன் என்ற இரண்டு விஞ்ஞானிகள் கீழ்க்கண்டவாறு விளக்கினர். தனித்தனி நியூக்லியான்களைப் பிணைக்கும் மைய விசையைத் தவிர, அணுக் கருக்களில் 'தற்சுழற்சி—வட்டப்பாதை இடையீட்டுச் செயல்கள்' நிகழ்கின்றன. $(\vec{L}\,.\,\vec{S})$ என்றும் இச் செயலீடுகளினால் $\vec{L}\,.\,\vec{S}$ என்ற மற்றுமொரு விசை நியூக்லியன்களின் ஆற்றல் மட்டங்களைப் பாதிக்கலாமென்றும் கூறினர். இத் தகைய தற்சுழற்சி—வட்டப்பாதை இடையீட்டுச் செயல்கள் கருவின் நியூக்லியான்களில் செயல்படுகின்றன என்பதற்குப் போதுமான சான்றுகள் உள்ளன. ஒரு நியூக்லியானின் மொத்தக் கோண உந்தம்

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}. \quad \text{இதில்} \quad |\vec{J}| = \sqrt{J(J+1)} \times h \text{ ஆகும்.}$$

$\vec{S}$ என்பது $\vec{L}$-க்கு இணையாகவோ அல்லது மாறு திசையில் இணையாகவோ இருக்குமாகையால் $\vec{J}$-விற்கு இரண்டு மதிப்புகள் கிடைக்கின்றன. ஒவ்வொரு (n, l) ஆற்றல் மட்டமும் இந்தத் தற்சுழற்சி—வட்டப்பாதை இடையீட்டுச் செயலினால்

இரண்டு ஆற்றல் மட்டங்களாகப் பிரிக்கப்படுகின்றன. இங்கு $\vec{L}$-ம் $\vec{S}$-ம் இணையாக இருப்பின் அதன் ஆற்றல் மட்டம் தாழ்ந்து இருக்கின்றது. எனவே, ஒவ்வொரு நியூக்ளியானின் ஆற்றல் நிலையும் n, l, $\vec{j}$ என்ற மூன்று குவான்டம் எண்களால் குறிக்கப் படுகின்றன. இவற்றில் $\vec{j} = l \pm \frac{1}{2}$.

ஒரு குறிப்பிட்ட l-ன் மதிப்பிற்கு, $\bar{j} = l + \frac{1}{2}$ ஆற்றல் மட்டம் $j = l - \frac{1}{2}$ ஆற்றல் நிலையைவிடக் குறைந்து காணப்படுகிறது. இது அணுவிலுள்ள எலக்ட்ரான்களின் ஆற்றல் மட்டங்களுக்கு முற்றிலும் முரணானது. இதிலிருந்து கருவின் தற்சுழற்சி-வட்டப் பாதை இடையீட்டுச் செயல் மின்காந்தத் தன்மை வாய்ந்ததன்று என்பது புலனாகின்றது.

n, l, j, குவான்டம் எண்கள் கொண்ட ஒவ்வோர் ஆற்றல் நிலைக்கும் $2j+1$ மதிப்புகள் கொண்ட m குவான்டம் எண்கள் உண்டு.

எனவே, பவுலியின் "தவிர்த்தல் தத்துவத்தின்"படி (Pauli's exclusion principle) n, l, j ஆற்றல் மட்டம் கூட்டில் $(2j+1)$ நியூட்ரான்களோ அல்லது புரோட்டான்களோதான் இருக்க முடியும் என நினைக்க வழியுண்டு.

j	1/2	3/2	5/2	7/2	9/2	11/2	13/2
புரோட்டான் அல்லது நியூட்ரான்களின் பெரும எண்ணிக்கை	2	4	6	8	10	12	14

அணுவிலுள்ள எலக்ட்ரான்களைப் போன்றே ஒவ்வொரு நியூக்ளியான் நிலையும் l-ன் மதிப்பையொட்டி s, p, d, என்ற எழுத்துகளால் குறிக்கப்படுகின்றன. J-ன் மதிப்பு எழுத்தின் கீழே (subscript) குறிக்கப்படுகிறது. எடுத்துக்காட்டாக $l = 0$-க்கு $S_{\frac{1}{2}}$ என்ற நிலையும், $l = 1$-க்கு $p_{\frac{1}{2}}, p_{\frac{3}{2}}$ என்ற நிலைகளும், $l = 3$-க்கு $d_{\frac{5}{2}}, d_{\frac{5}{2}}$ என்ற நிலைகளும் உள்ளன.

ஒரு துகளின் ஆற்றல் மட்டங்களின் சீர் வரிசை படம் 5·8-ல் காட்டப்பட்டுள்ளது. இதனின்றும் n, l குவான்டம் எண்கள் கொண்ட, மைய விசையினால் உற்பத்தியாகும் ஒரு "தற்சுழற்சி

வட்டப்பாதை'' இடையீட்டுச் செயலினால் எவ்வாறு இரண்டாகப் பிரிகின்றது என்பதை அறியலாம். படத்தில் கண்ட சீர்வரிசை, சோதனைகளிலிருந்து பெறப்பட்ட முடிவுகளுக்கேற்ப சரிசெய்யப்பட்டுள்ளது. மாய எண்களின் அருகில் கிடைக்கும் ஆற்றல் இடைவெளி படத்தில் நன்கு காட்டப்பட்டுள்ளது. இந்த இடைவெளி, l-ன் மதிப்பு அதிகமாகும் ஒவ்வொரு முறையும் ஏற்பட்டு அதிகமான ''தற்சுழற்சி—வட்டப்பாதை'' ஆற்றல் மட்டங்களின் உடைப்பை ஏற்படுத்துகின்றது.

அணுக்கருக்களின் கூடுமாதிரியமைப்பானது கருக்களின் உறுதிநிலை, அவற்றின் நான்குமுனைத் திருப்புத் திறன்களின் அடுத்தடுத்த மாற்றங்கள், கருக்களின் நியூட்ரான் கவர்ச்சியின் முகப்பரப்பு போன்ற பல பண்புகளை விளக்கினாலும் அணுக்கருப் பிளவுச் செயலீட்டை அதனால் விளக்க முடியவில்லை. ஏனெனில், பிளவுச் செயலீட்டில் கருவிலுள்ள நியூக்லியான்கள் ஒன்றுசேர்ந்து இயங்குகின்றன.

தற்போது அணுக் கருவிற்கு, திரவத்துளி மாதிரியமைப்பு கூடுமாதிரியமைப்பு இரண்டும் சேர்ந்த ''கூட்டு மாதிரியமைப்பு (collective model) ஒன்று நிறுவப்பட்டிருக்கிறது. அது அணுக்கருக்களின் பண்புகள் செயலீடுகள் முதலியவற்றை நன்றாக விளக்குகிறது எனலாம்.

வினாக்கள்

1. அணுக்கருவின் பொதுத் தன்மைகளைப் பற்றி ஒரு கட்டுரை வரைக.

2. அணுக்கரு விசைகள் எத் தன்மைகளைக் கொண்டிருக்கின்றன ? அத் தன்மைகளை எவ்வாறு நாம் விளக்கலாம்.

3. அணுக்கருக்கள் எவ் வகைத் துகள்களைக் கொண்டு ஆக்கப்பட்டிருக்கின்றன ? அணுக் கருவில் எலக்ட்ரான்கள் இருக்க முடியாது என்பதைக் காரணம் காட்டி விளக்குக.

4. அணுக் கருவின் 'திரவத்துளி மாதிரியமைப்பு' என்றால் என்ன ? அதன் அடிப்படையில் கருக்களின் பிணைவு ஆற்றலுக்கான கோவையைத் தருவி.

5. அணுக் கருவின் 'கூடு மாதிரியமைப்பு' பற்றி ஒரு கட்டுரை வரைக.

6. கீழ்க்கண்டவற்றிற்குக் குறிப்பு வரைக.

(i) அணுக்கருவின் பரிமாணம்.

(ii) நிறைக்குறை, பொதிவுக் குறைவு

(iii) அணுக்கரு விசையை விளக்க யுகாவா கொடுத்த கோட்பாடு.

(iv) "மாய எண்கள்"

6. நியூட்ரான் இயற்பியல்

6·1 நியூட்ரான் கண்டுபிடிப்பு

அணுக் கருவில் புரோட்டான்கள் உள்ளன என்றும், அணுக் கருவின் பொருண்மை, நிறை ஆகியவற்றைச் சரியீடு செய்யப், புரோட்டான்களைத் தவிர்த்து மற்றொரு வகைத் துகளும் இருக்க வேண்டுமென்றும் முன்னரே பார்த்தோம். இத் துகள்கள் புரோட்டான்களின் நிறைக்குச் சமமான நிறை கொண்டனவாகவும், அவற்றிற்கு மாருக மின்னூட்டமற்றவையாகவும் இருக்க வேண்டும் என்றும் கண்டோம். அதனுல்தான் இத் துகள்கள் 'நியூட்ரான்'கள் என்று அழைக்கப்பட்டன. கருவில் புரோட்டான்களும் நியூட்ரான்களும் ஓர் ஈர்ப்பு விசையால் பிணைக்கப்பட்டிருக்கின்றன என்பது நன்கு மெய்ப்பிக்கப்பட்ட ஓர் உண்மை.

முதன் முதலாக நியூட்ரானை ரூதர் போர்டின் மாணவரான சாட்விக் (Chadwick) என்பவர் 1932ஆம் ஆண்டு கண்டுபிடித்தார். என்ருலும் அதற்கு அடிப்படையான சோதனைகளெல்லாம் ஐரோப்பாவில் 1930ஆம் ஆண்டிலிருந்தே நிகழ்த்தப்பட்டன. பொத்தே (Boethe), பெக்கர் (Beaker) என்ற இரு விஞ்ஞானிகள் நியூட்ரான்களைக் கண்டுபிடிப்பதற்குச் சாதகமான ஒரு சோதனையை 1930-ல் நிகழ்த்தினர். இயற்கையிலேயே α கதிர்களை வெளியிடக்கூடிய பொலோனியம் (Polonium) என்ற α கதிர் உமிழியின்றும் பெறப்படும் α துகள்களைக் கொண்டு 'பெரிலியம்' (Berilium) போன்ற இலேசான தனிமங்களைத் தாக்கியபொழுது பொருள்களுள் மிகத் தொலைவு ஊடுருவிச் செல்லும் தன்மை வாய்ந்த, அயனியாக்கம் உண்டாக்காத, ஒரு கதிரியக்கம் வெளியேறுவதைக் கண்டனர். இதனை அவர்கள் முதலில் தவருக γ கதிரியக்கம் எனவும் முடிவு செய்தனர்.

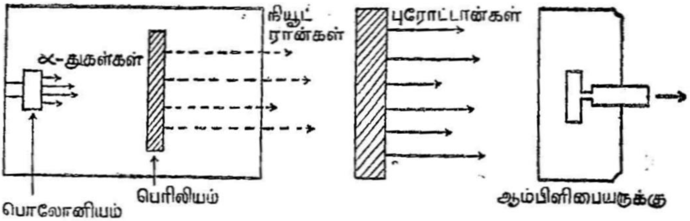
$$_{9}Be^{14} + {}_{2}He^{4} \longrightarrow {}_{6}C^{13} + \gamma \quad \ldots \quad (6{\cdot}1)$$

இதைத் தொடர்ந்து, ஐரின் கியூரியும், ஜோலியோவும் இந்தக் கதிரியக்கத்தின் தன்மைகளை அறிய மேலும் பல சோதனைகளை நிகழ்த்தினுர்கள். அயனிக் கலத்திற்கும் பெரிலியத்திற்கும்

டையே பாரபின் (Paraffin) போன்ற ஹைடிரஜன் அடங்கிய பொருள்களை வைத்து, அவற்றிலிருந்து பெறப்பட்ட துகள்களைப் புரோட்டான்கள் என மெய்ப்பித்தனர். ஆயினும் அவர்களும் மேற்கண்ட கதிரியக்கம் γ கதிரியக்கமாக இருக்குமோ என ஐயமுற்றனர்.

1932ஆம் ஆண்டு சாட்விக் ஓர் அயனிக் கலத்தில் நைட்ரஜன் வாயுவைச் செலுத்தி மேற்கண்ட கதிரியக்கத்தை ஆராய்ந்தார். இச் சோதனையில் நைட்ரஜன் அணுக் கரு பின்னடையும் வேகத்தைக் கணக்கிட்டுப் பாரபினின்றும் வெளிவரும் கதிரியக்கம் γ கதிரியக்கமாக இருக்க முடியாதென்றும், இத் துகள்கள் மின்னூட்டம் அற்றவையாக இருக்கவேண்டுமென்றும் விளக்கினர். தவிர, இவை நிறையில் ஏறத்தாழ புரோட்டான் நிறைக்குச் சமமாக இருக்கக் கூடுமென்றும் அவர் கண்டறிந்தார். இத் துகளை நியூட்ரான் எனவும் அவர் அழைத்தார்.

$$9Be^{14}+2He^{14}\longrightarrow 14N^{7}+{}_{0}n^{1} \qquad \dots \quad (6{\cdot}2)$$



படம் 6·1
நியூட்ரான்களைக் கண்டுபிடிக்கச் சாட்விக் பயன்படுத்திய ஆய்வுக்கருவி

6·2 நியூட்ரான்களின் மூலம் (Source of Neutrons):

நியூட்ரான்கள் மின்னூட்டம் அற்றவையாக இருப்பதால், பொருள்களினூடே ஊடுருவிச் செல்லும் தன்மை வாய்ந்தவையாக உள்ளன. மேலும் இவை ஊடுருவிச் செல்லும்போது அயனியாக்கம் உண்டாக்குவதில்லை. எனவே, நியூட்ரான்களைக் கொண்டு அணுக் கருக்களில் மோதல்களை எளிதில் நிகழ்த்தி அக் கருக்களின் தன்மைகளில் சிலவற்றை அறிய இயலும். இதனால், சோதனைச் சாலைகளில் நியூட்ரான்களை அதிக அளவில் உற்பத்தி செய்யவேண்டிய தேவை ஏற்பட்டிருக்கிறது.

பொதுவாக, அணுக் கருச் செயலீடுகளில் ஒரு பிரிவான α துகள்-நியூட்ரான் செயலீட்டிலிருந்துதான் நியூட்ரான் கற்றைகள் (Neutron beams) பெறப்படுகின்றன. பொலோனியம்,

புளூட்டோனியம் தனிமங்களிலிருந்து பெறப்படும் α துகள்களைக் கொண்டு பெரிலியம் போன்ற தனிமங்களைத் தாக்குவதால் மிக எளிதில் நியூட்ரான்கள் கிடைக்கின்றன. இவற்றைத் தவிர ஏறக் குறைய எல்லாத் தனிமங்களும் அதிக ஆற்றல் படைத்த துகள் களால் மோதப்படுகின்றபொழுது நியூட்ரான்களை உமிழ் கின்றன எனலாம். இவற்றை, $(\alpha-n)$, $(\gamma-n)$, $(n-2n)$ செய வீடுகள் என்று வகைப்படுத்தலாம். மேற் கூறிய முறைகள் பல வற்றால் நியூட்ரான்கள் பெறப்பட்டாலும் மிக எளிய முறையில் அதிக அளவில் நியூட்ரான்களைக் கொடுக்கின்ற சில முறைகளை மட்டிலும் இங்குக் காண்போம்.

(i) பொலோனியம், ரேடியம் போன்ற கதிரியக்கப் பொருள்கள் உமிழும் α கதிர்களைக் கொண்டு, பெரிலியம், போரான் போன்ற இலேசான தனிமங்களைத் தாக்குகின்ற பொழுது ஏற்படும் செயலீடுகளிலிருந்து நியூட்ரான்கள் கிடைக் கின்றன. இயற்கைக் கதிரியக்கமுடைய தனிமங்களான பொலோ னியம், ரேடியம் ஆகியவற்றில் ஏதேனும் ஒன்றோடு பெரிலியம் தனிமத்தை நன்கு தூள்செய்து 2 செ. மீ. நீளம், 2 செ.மீ. குறுக் களவுள்ள பிளாட்டினம் அல்லது துருப் பிடிக்காத எஃகினால் (Stainless steel) ஆன சிறு குழாய்களில் வைத்துக்கொண்டால், இவை ஏறத்தாழ 10 மி. எ. வோ. அல்லது அதற்கும் மேலான ஆற்றலைக் கொண்ட நியூட்ரான்களைக் கொடுக்கும். இவை வினாடி ஒன்றுக்கு 10^8 துகள்களைக் கொடுக்கக்கூடியவை. இவற்றைத் தவிர நியூட்ரான்களைக் கொடுக்கும் வேறு மூலங்களும் உள்ளன. பெரிலியம், போரான் ஆகிய தனிமங்கள் எந்தக் கதிரியக்கப் பொருள்களுடன் சேர்க்கப்படுகின்றனவோ, அந்தப் பொருள் களைப் பொறுத்து அதிலிருந்து பெறப்படும் நியூட்ரான்களின் கதிரியக்கம் அமைகிறது. ரேடியம்-பெரிலியம் மூலம் 1620 ஆண்டுகள் அரைவாழ்வுக் காலம் கொண்டவை. எனவே அவை சோதனைச் சாலைகளில் பயன்படக் கூடியவை எனத் தோன்றும். ஆனால், இம் மூலம், நியூட்ரான்களோடு γ-கதிர்களையும் வெளியிடு கின்றது. எனவே, தற்போது சோதனைச் சாலைகளில் அமெரிசியம்-பெரிலியம் மூலந்தான் நியூட்ரான்களைப் பெறப் பயன்படுத்தப் படுகின்றது. அமெரிசியத்தின் அரைவாழ்வுக் காலம் 458 ஆண்டுகள். இது விநாடிக்கு 10^5 நியூட்ரான்களைக் கொடுக் கின்றது.

(ii) ஃபோட்டோ (போட்டோ) நியூட்ரான்கள் (Photo neutrons)

இலேசான தனிமங்களை ஃபோட்டான்களைக் (Photon) கொண்டு தாக்கும்பொழுது ஏற்படும் செயலீட்டிலிருந்தும் நியூட்

ரான்கள் கிடைக்கின்றன. இவை ஃபோட்டோ நியூட்ரான்கள் என அழைக்கப்படுகின்றன. பொலோனியம், ரேடியம் ஆகிய கதிரியக்கப் பொருள்களோடு டியூட்ரியம், பெரிலியம் ஆகிய வற்றைக் கலந்தால், இக் கலவை போட்டோ நியூட்ரான்களைக் கொடுக்கிறது. இம் மூலம் வினாடி ஒன்றுக்கு 10^6 நியூட்ரான்களைக் கொடுக்கிறது. ஆனால், இது காமா (γ) கதிரியக்கத்தையும் கூடவே கொடுப்பதால் சோதனைச்சாலைகளில் அதிகம் பயன் படுத்தப்படுவதில்லை.

இவற்றைத் தவிர. துகள் முடுக்கி எந்திரங்களிலிருந்து கிடைக்கும் அதிகத் திசைவேகங்களுள்ள புரோட்டான்கள், டியூட் ரான்கள் ஆகியவற்றைக் கருக்களின்மீது மோதச் செய்து நியூட் ரான்களைப் பெறலாம். அணு உலைகளிலிருந்தும் வெவ்வேறு திசை வேகங்கள் கொண்ட நியூட்ரான்களைப் பெறலாம்.

6·3 நியூட்ரான்களைக் கண்டறிதல்.

நியூட்ரான்கள் அணுக்களோடு மோதுகின்றபோது அவற் றில் அயனியாக்கமோ, செயலூக்கமோ நிகழ்வதில்லை. எனவே, நியூட்ரான்களை அவை நிகழ்த்தும் நேரடி மோதல்களிலிருந்து (Direct impact) கண்டறிய முடியாது. குறைந்த திசை வேகங்கள் கொண்ட நியூட்ரான்கள், போரான் கருவோடு மோதும்போது கீழ்க்கண்ட செயலீடு நிகழ்கிறது.

$$_5B^{10} + _0n^1 \longrightarrow _3Li^7 + _2He^4 \qquad \ldots \quad (6 \cdot 3)$$

இச் செயலீடு அதிக நிகழ்திறனோடு ஏற்படுகிறது. நியூட் ரான்களின் திசைவேகம் குறையக் குறைய இச் செயலீட்டின் நிகழ்திறன் அதிகரிக்கிறது. எனவே, இச் செயலீட்டின்மூலம் குறைந்த திசை வேகங்களைக் கொண்ட நியூட்ரான்களைக் கண்டு பிடிக்கலாம். ஒரு விகிதக் கணிப்பானையோ (proportional counter) அல்லது அயனிக்கலத்தையோ (ionising chamber) போரான் ட்ரை ஃபுளோரைடு (Boron tri fluoride) வாயு கொண்டு நிரப்ப வேண்டும். இவ்வாறு நிரப்பப்பட்ட காட்டிகளில் (particlc detectors) குறைந்த திசைவேகமுடைய நியூட்ரான்கள் செல்கின்ற பொழுது, மேற்கண்ட சமன்பாட்டின்படி, அத் துகள்கள் உற்பத்தி யாகின்றன. இந்த α துகள்களைக் கண்டறிவதன்மூலம் குறைந்த திசைவேகமுடைய நியூட்ரான்களைக் கண்டறியலாம். இவ்வாறு விகிதக் கணிப்பான் அல்லது அயனிக் கலத்தில் ஹைடிரஜன் வாயுவையோ அல்லது ஹைடிரஜன் கலந்த வாயுவையோ நிரப்பி அதில் அதிகத் திசை வேகமுடைய நியூட்ரான்களைச் செலுத்துவ

தால் நிகழும் செயலீட்டிலிருந்து, புரோட்டான்கள் உற்பத்தி செய்யப்படுகின்றன. இப் புரோட்டான்களைக் கண்டறிவதன் மூலம் அதிகத் திசைவேகம் (fast) கொண்ட நியூட்ரான்களைக் கண்டுபிடிக்கலாம்.

அணுப்பிளவுக் கலங்களைக் (fission chambers) கொண்டும் நியூட்ரான்களைக் கண்டுபிடிக்கலாம். இக் கலங்களில் குறைந்த திசைவேகமுடைய நியூட்ரான்களைக் கண்டுபிடிப்பதற்கு, $_{92}U^{235}$ தனிமங்கள் பூசப்பட்டிருக்கும். அல்லது அதிகத் திசைவேகம் கொண்ட நியூட்ரான்களைக் கண்டுபிடிப்பதற்கு $_{92}U^{238}$ தனிமங்கள் பூசப்பட்டிருக்கும். கலங்களின் சுவர்களில் நியூட்ரான்கள் படுகின்றபொழுது கீழ்க்கண்ட செயலீடுகள் நிகழ்கின்றன.

$$_{92}U^{235} + {_0n^1} \rightarrow x + y \qquad \ldots \quad (6{\cdot}4)$$
(குறைந்த திசைவேகம் கொண்டது)

$$_{92}U^{238} + {_0n^1} \rightarrow x' + y' \qquad \ldots \quad (6{\cdot}5)$$
(அதிகத் திசைவேகம் கொண்டது)

மேற்கண்ட சமன்பாடுகளில் x-ம் y-ம், x'-ம் y'-ம் பிளவைத் துண்டுகளாகும். இப் பிளவைத் துண்டங்கள் கலன்களில் உள்ள வாயுக்களில் அயனியாக்கத்தை உண்டாக்குகின்றன. இந் நிகழ்ச்சியானது கலனில் ஒரு மின் துடிப்பை (electric pulse) உருவாக்குகிறது. இத் துடிப்பைக் கண்டுபிடிப்பதிலிருந்து நியூட்ரான்களைக் கண்டறியலாம்.

மங்கனீசு, தங்கம், வெள்ளி, ரேடியம் போன்ற தனிமங்கள் நியூட்ரான்களை உட்கவர்ந்து, β கதிர்களை உமிழ்கின்றன. இன்டியம் என்ற உலோகத்தில் கீழ்க்கண்ட செயலீடுகள் நிகழ்கின்றன.

$$_{49}In^{115} + {_0n^1} \longrightarrow {_{49}In^{116}} \qquad \ldots \quad (6.6)$$

$$_{49}In^{116} \longrightarrow {_{50}Sn^{116}} + \bar{\beta} \qquad \ldots \quad (6{\cdot}7)$$
$$(T_{\frac{1}{2}} = 54 \text{ நிமிடங்கள்})$$

இச் செயலீட்டில் வெளியிடப்படுகின்ற β கதிர்களின் கதிரியக்கத்தை அளப்பதன்மூலம் நியூட்ரான்களைக் கண்டுபிடிக்கலாம். இம் முறையில் ஒரு குறிப்பிட்ட அளவு ஆற்றலுக்கு அதிகமான ஆற்றல் படைத்த நியூட்ரான்களையே கண்டுபிடிக்க இயலும்.

மற்றும் ஒளிப்படக் கூழ்முறை, (photographic emulsion) தீப் பொறிக்கலன் (spark chamber) குமிழ்க்கலன் (bubble

chamber) என்ற ஆய் கருவிகளைக் கொண்டும் நியூட்ரான்களைக் கண்டுபிடிக்கலாம்.

6·4. நியூட்ரானின் தன்மைகள்

(i) *நியூட்ரானின் நிறை*

நியூட்ரானின் நிறையை முதலில் சாட்விக் என்ற விஞ்ஞானி தான் கண்டுபிடித்தார். அவர் நைட்ரஜன் அடங்கிய மென்படலத்தை நியூட்ரான்களைக் கொண்டு தாக்கி, அதனின்றும் வெளி வருகின்ற நைட்ரஜன் கருவின் திசைவேகம், ஹைடிரஜனி லிருந்து வெளிவருகின்ற ஓரலகு நிறைகொண்ட புரோட்டானின் திசைவேகத்தில் ஏழில் ஒரு பங்கு எனக் கண்டார். இத் தகை வின்மூலம், நியூட்ரானின் நிறையை அவர் பின்வருமாறு கணக்கிட்டார்.

புரோட்டானின் பெருமத் திசைவேகம்

$$= 3{\cdot}5 \times 10^{9} \text{ செ.மீ./விநாடி.}$$

நைட்ரஜன் கருவின் பெருமத் திசைவேகம்

$$= 5{\cdot}0 \times 10^{8} \text{ செ.மீ./விநாடி.}$$

$$\frac{v_P}{v_N} = \frac{M_W + M}{M_P + M}.$$

இதில் v_P என்பது புரோட்டானின் திசைவேகம்

v_N என்பது நைட்ரஜன் கருவின் திசைவேகம் ... (6·8)

M_N – நைட்ரஜன் கருவின் நிறை

M – நியூட்ரானின் நிறை

$$\frac{14 + M}{1 + M} = \frac{3{\cdot}5 \times 10^{9}}{5{\cdot}0 \times 10^{8}} = 7.$$

$$M = \frac{7}{6} = 1{\cdot}16 \text{ அ. நி. அ.}$$

மேற்கண்ட சமன்பாட்டிலிருந்து நியூட்ரானின் நிறை புரோட்டானின் நிறையைக் காட்டிலும் 16 விழுக்காடு அதிகம் என்பதை நாம் அறிகிறோம். ஆனால், பிற்காலத்தில், நியூட்ரானும் புரோட்டானும் ஏறக்குறையச் சமநிறை உடையவை என்பதைப் பல சோதனைகள் எடுத்துக் காட்டின. அவற்றுள் முதன்மையானது டியூட்ரானின் ஒளிச் சிதைவு (photo disintegration of dentron) ஆகும். இச் செயலீட்டைக் கீழ்க்கண்ட சமன்பாடு விளக்குகிறது.

$$H^2 + \gamma \rightarrow H^1 + n \qquad \ldots \quad (6{\cdot}9)$$

டியூட்ரியத்தில் நியூட்ரானின் பிணைப்பு ஆற்றல் 2·226 மி.எ.வோ. இது ·002389 அ.நி. அலகிற்குச் சமம்.

டியூட்ரானின் நிறை	= 2·014735 அ. நி. அ.
நியூட்ரானின் பிணைப்பு ஆற்றல்	= 0·002389 ,,
சமன்பாட்டில் இடதுபக்க ஆற்றல்	= 2·017124 அ. நி. அ.
புரோட்டானின் நிறை	= 1·008142 அ. நி. அ.

எனவே

நியூட்ரானின் நிறை = 1·008982 அ. நி. அ.

ஆனல், தற்காலத்தில் C^{12} அளவு முறையில் ஏற்றுக் கொள்ளப்பட்ட நியூட்ரானின் நிறை M_n = 1·008665 அ. நி. அ. ஆகும்.

(ii) நியூட்ரானின் அளவு

ஒரு அணுவின் சராசரி அளவு 10^{-8}செ.மீ. என்பதும், அணுக் கருவின் அளவு 10^{-12} செ. மீ. என்பதும் நாம் அறிந்ததே. இதைப் போல அடிப்படைத் துகளான நியூட்ரானும் ஓர் அளவைக் கொண்டிருத்தல் வேண்டும் என்று எண்ணுவது இயற்கையே. நியூட்ரானின் அளவைக் கணிப்பதற்கு அதன் டி-பிராக்லி அலை நீளங்களை அளந்தாலே போதுமானது. அணுவின் அளவிற்கு அதாவது 10^{-8} செ. மீ. அளவிற்கு நியூட்ரானின் அலை நீளம் இருக்கவேண்டுமானல், அதன் ஆற்றல் ஒரு மில்லியன் வோல்ட்டுகளுக்குச் சிறிது குறைவாக இருக்க வேண்டும். ஆனல், மெதுவாக நகர்ந்துகொண்டிருக்கும் நியூட்ரானின் ஆற்றல் 0·1 *eV* இருந்தால் அதன் அலை நீளம் 10^{-8} செ. மீட்டருக்குச் சமமாக இருக்கும். இத்தகைய குறைவான ஆற்றல் கொண்ட நியூட்ரானைத் ' துகள் ' என்று அழைப்பதைவிட ' அலை ' என்று அழைப்பதே பொருத்தமாக இருக்கும் எனலாம். டி பிராக்லியின் அலைப்பண்புக் கோட்பாட்டின்படி m நிறையுள்ள நியூட்ரான் V திசை வேகத்தோடு செல்லுமானல், அதன் அலை நீளம் = h/m என்ற சமன்பாட்டிலிருந்து பெறப்படுகிறது. இச் சமன்பாட்டில் h என்பது பிளாங்கின் மாறிலி.

(iii) நியூட்ரானின் காந்தச் சுழல் திறன்

நியூட்ரானுக்கு எதிர்க்குறி கொண்ட ஒரு காந்தச் சுழல்திறன் உண்டென்று நாம் முன்பே கண்டோம். இதைப் பின் வருமாறு விளக்கலாம்.

நியூட்ரானை ஒரே அளவு நேர் மின்னூட்டத்தையும் எதிர், மின்னூட்டத்தையும் கொண்ட ஒரு கூட்டுத் துகள் என்று கொண்டால் அதற்கு ஒரு காந்தச் சுழல் திறனைக் கற்பனை செய்யலாம். ஒரு குறுகிய கால அளவிற்காவது நியூட்ரான் புரோட்டான் ஆகவும் π மீசானாகவும் மாறுகிறது. அதிக நிறையுடைய புரோட்டானைக் காட்டிலும் அதிக அளவு இயங்கும் தன்மை நியூட்ரான் பெற்றிருக்கவேண்டும் என்று நினைக்கலாம். எனவே, நியூட்ரானின் காந்தச் சுழல் திறனின் பெரும்பகுதி இந்த π மீசானின் காரணமாகத்தான் கிடைக்கிறது எனலாம். இதனால்தான் நியூட்ரானின் சுழல்திறன் எதிர்க்குறியைக் கொண்டுள்ளது எனலாம்.

நியூட்ரானின் காந்த இருமுனைச் சுழல்திறனை முதன்முதலாகக் கண்டறிந்தவர்கள் ப்லோச் (Bloch), ஆல்வாரெஸ் (Alvarez) என்ற இரு விஞ்ஞானிகள் ஆவர். இதன் மதிப்பு $-1{\cdot}913\pm0{\cdot}0006$ நியூக்லியர் மாக்னெட்டான் எனக் கணிக்கப்பட்டிருக்கிறது. இது காந்த ஒத்ததிர்வு (magnetic resonance) முறையினால் கண்டறியப்பட்டது.

(iv) நியூட்ரானின் கதிரியக்கம்

நியூட்ரானானது புரோட்டானை விட 0·782 மி. எ. வோ. அதிகமான நிறையுடையது என அறிகிறோம். இந் நிறை வேறுபாடு சாட்விக், கோல்ட் ஹாபர் என்ற இரு விஞ்ஞானிகளைத் தனித்த நியூட்ரான் நிலையற்றதாக இருக்க வேண்டும் என நினைக்கத் தூண்டியது. அதாவது, தனித்த நியூட்ரான் β கதிரியக்கத்தினால், எலக்ட்ரானாகவும், புரோட்டோனாகவும் மாறக்கூடும் என்று எண்ணினர். ஸ்னெல் (Snell) ரோப்சன் (Robson) என்ற விஞ்ஞானிகள் இக் கதிரியக்கத்தைச் சோதனைமூலம் உண்மைப்படுத்தினர். தனித்த நியூட்ரான் 12·8 நிமிடங்கள் அரைவாழ்வுக் காலம் கொண்ட ஒரு β உமிழி என்பது அவர்கள் சோதனைகளினின்றும் பெறப்பட்டது.

$$_0N^1 \longrightarrow {}_1H^1 + e^- + \gamma^+ \quad \ldots \quad (6{\cdot}10)$$

இதிலிருந்து நியூட்ரான் ஒரு கதிரியக்கமுடைய துகள் என அறியலாம்.

(v) நியூட்ரானின் விளிம்பு விளைவு (neutron diffraction):

நியூட்ரானின் அலைத் தன்மை (wave nature of neutron):

நியூட்ரான்களை அவற்றின் திசை வேகங்களைப் பொறுத்து மூன்று வகைகளாகப் பிரிக்கலாம்.

1. அதி திசைவேகமுடைய நியூட்ரான்கள் (Fast neutrons)

   இவை ஏறத்தாழ 100 கி. எ. வோல்ட்டுக்கு அதிகமான ஆற்றல் பெற்றிருப்பவை.

2. நடுநிலைத் திசைவேகமுடைய நியூட்ரான்கள் (Intermediate speed neutrons)

   இவை ஏறத்தாழ 100 எ. வோல்ட்டிலிருந்து 100 கி. எ. வோல்ட்டு வரை ஆற்றல் பெற்றிருப்பவை.

3. குறைந்த திசைவேகம் கொண்ட நியூட்ரான்கள்.

   இவை 100 எ. வோ-லிருந்து 0·025 எ. வோ. வரை ஆற்றல் பெற்றிருப்பவை. இவை அணுக் கருக்களின் வெப்பச் சலன ஆற்றல் அளவிற்கு ஆற்றல் வாய்ந்தவை எனலாம். இவை கருக்களோடு வெப்பச் சமநிலையில் உள்ளன எனலாம்.

வெப்பச் சலன ஆற்றலைக் கீழ்க்கண்டவாறு கணக்கிடலாம்.

வெப்பச் சலன ஆற்றலுக்கான சமன்பாட்டை $E = kT$ என எழுதலாம். இங்கு k என்பது போல்ட்ஸ்மென் மாறிலியையும் (Boltzmann's Constant) T என்பது கெல்வின் அளவீட்டில் வெப்ப நிலையையும் குறிக்கும். அறையின் வெப்ப நிலையை 20° சென்டி கிரேடு அல்லது 293°K என்று எடுத்துக்கொண்டு, மதிப்புகளை மேற்கண்ட சமன்பாட்டில் பதிலீடு செய்தால்,

$$E = \frac{(1{\cdot}37 \times 10^{-16})293}{1{\cdot}6 \times 10^{-12}} = 0{\cdot}025 \text{ எ. வோ.}$$

இந்த ஆற்றல் மட்டத்தில், நியூட்ரானின் திசை வேகம் v என்றால்

$$v^2 = \frac{2\,kT}{m}$$

$$\text{அல்லது} \quad v = \sqrt{\frac{2(1{\cdot}37 \times 10^{-16})293}{1{\cdot}6 \times 10^{-24}}} \text{ செ.மீ./வினாடி}$$

$$= (4{\cdot}8 \times 10^{10})^{\frac{1}{2}} \text{ செ. மீ./வினாடி}$$

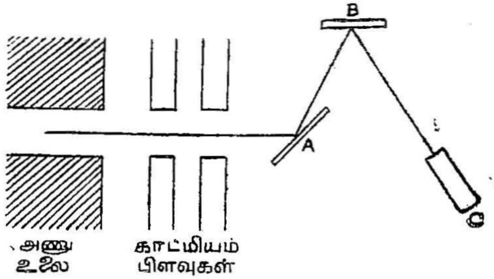
$$\therefore \quad v = 2200 \text{ மீட்டர்கள்/வினாடி}$$

நியூட்ரானின் டி பிராக்லி அலைநீளங்களை h/mv என்ற சமன்பாட்டிலிருந்து பெறலாம் என்று நாம் முன்னரே கண்டோம். இங்கு h என்பது பிளாங்கின் மாறிலியையும், m நியூட்ரானின் நிறையையும், v என்பது அதன் திசைவேகத்தையும் குறிக்கும்.

இதையொட்டி அதிக திசைவேகமுடைய நியூட்ரான்களின் டி பிராக்லி அலைநீளம் (De Broglie wavelength) கணிக்கப் பட்டிருக்கிறது.

வெப்ப நியூட்ரான்களுக்கு (Thermal Neutrons) அலைநீளம் 2A° ஆகிறது. வெப்ப நியூட்ரான்களின் அலைநீளம் ஏறத்தாழப் படிகங்களில் உள்ள இரண்டு அணுக்களுக்கிடையேயுள்ள தொலைவிற்குச் சமமாக இருப்பதால், இவை படிகங்களின் வழியே ஊடுருவிச் செல்லும்போது "விளிம்பு வளைவு" (Diffraction) அடைகின்றன. இவ் விளிம்பு வளைவு, X கதிர்கள், எலக்ட்ரான்கள் போன்றவை தடுப்புகளில் (Obstacles) அடையும் விளிம்பு வளைவுகளைப் போன்றுள்ளது. எனினும், அவை ஒன்றுக்கொன்று மாறுபட்ட நிகழ்ச்சிகளேயாகும்.

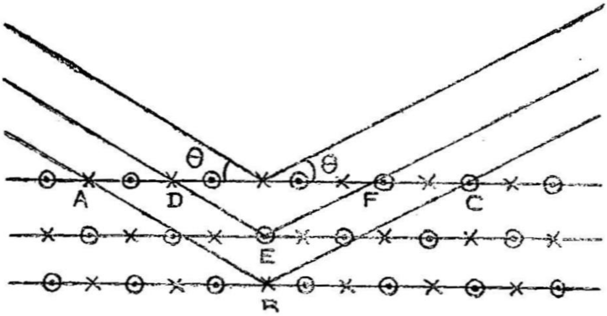
X கதிர்களின் சிதறல், ஃபோட்டான்களுக்கும், அணுவிலுள்ள எலக்ட்ரான்களின் மின்காந்தப் புலத்திற்கும் இடையே ஏற்படுகின்ற செயலீட்டில் உண்டாவதாகும். எலட்ரான்களின் சிதறல் இரண்டு மின்னூட்டங்களுக்கிடையே ஏற்படும் செயலீட்டினல் ஏற்படுவதாகும். ஆனல், நியூட்ரான் சிதறல் நியூட்ரான்களுக்கும், அணுக்கருக்களுக்குமிடையேயுள்ள மிக வலிமையான கருவிசையினல் ஏற்படுகின்ற ஒரு நிகழ்ச்சியாகும். இத்தகைய சிதறல்களில் சிதறல் கோணங்கள் அதிக அளவில் மாறுபடுகின்றன.



படம் 6·2.
நியூட்ரான்களின் சிதறல்

இவ்வாறு படிகங்களின் அணுக்களில் நியூட்ரான் சிதறலடைகின்றபொழுது அணுக்களுக்கு இடையேயுள்ள தொலைவு $2d \sin\theta = n\lambda$ என்ற சமன்பாட்டிற்கு (பிராகின் விதி) உட்பட்டால் θ என்ற கோணத் திசையில் குறுக்கீட்டு வளைவு ஏற்பட்டுப் பெருமச்செறிவு (High intensity) உண்டாகிறது.

X கதிர் விளிம்பு வளைவினல் கிடைக்கும் "லவேப்" புள்ளிகளைப் போலவே (Lave's spots) நியூட்ரான்களின் விளிம்பு வளைவினலும் புள்ளிகள் கிடைக்கின்றன. ஆனல் *X* கதிர்களைக் கொண்டு



படம் 6·3
நியூட்ரான் சிதறல்

விளைவிக்கப்பட்ட புள்ளிகள் நியூட்ரான் விளிம்பு விளைவினல் கிடைக்கும் புள்ளிகளைவிடக் குறைந்த செறிவு (low intensity) உடையனவாக இருக்கின்றன.

நியூட்ரான்களின் விளிம்பு விளைவுகளும் *X* கதிர்களின் விளிம்பு வளைவுகளைப் போலவே பிராக்கினல் நிறுவப்பட்ட பிராக் நிரல்மானியைக் கொண்டு (Bragg's spectometer) சோதிக்கப்படுகின்றன. அணு உலையிலிருந்து கிடைக்கும் நியூட்ரான்கள் (படம் 6·2) காட்மியம் பிளவுகளின் வழியாகச் செலுத்தப்பட்டுக் கால்சைட்டு அல்லது லிதியம் ப்ளோரைடு (Calciteor lithium fluoride) படிகத்தினல் விளிம்பு விளைவுக்கு உள்ளாகின்றன. சிதறிய நியூட்ரான்களின் செறிவு போரான் ட்ரை புளோரைடு (BF_3) 'எண்ணி'களால் அளக்கப்படுகின்றன. இவ் வெண்ணிகளில் பயன்படுத்தப்படும் போரானில் ஏறத்தாழ 90 விழுக்காடு B^{10} ஐசோடோப்புகளால் ஆனது. இவை கீழ்க்கண்ட α துகள் செயலீடுகளை ஊக்குவிக்கின்றன.

$$_5B^{10} + _0n^1 \longrightarrow {}_3Li^7 + {}_2He^4 \qquad \ldots \quad (6\cdot 11)$$

அதிக ஆற்றல் வாய்ந்த இந்த α துகள்கள் ஊடகங்களில் அதிக அளவு அயனியாக்கத்தை உண்டாக்குகின்றன. இந்த அயனியாக்கத்தை அளப்பதன் மூலம் நியூட்ரான்களின் ஆற்றலைக் கணிக்கலாம்.

6·5 நியூட்ரான் செயலீடுகள். (Nuetron Interaction)

ஓர் ஊடகத்தினுள் ஒரு துகள் ஊடுருவும்பொழுது வெவ்வேறு செயலீடுகள் நடைபெறலாம். நியூட்ரான்களைப் பொறுத்த வரையில், அவை அணுக்களினூடே செல்லும்போது ஏற்படும் விளைவுகளை இரு பெரும் பிரிவுகளாகப் பிரிக்கலாம். அவை

(i) சிதறல் (scattering)

(ii) உட்கவர்ச்சி (absorption)

நியூட்ரான் கருக்களோடு மோதும்போது இருவகைச் சிதறல்கள் நிகழ்கின்றன.

(i) மீட்சியுறு மோதல் (Elastic scattering)

(ii) மீட்சியுரு மோதல் (Inelastic scattering)

மீட்சியுறு மோதலில் மோதலுக்குள்ளான அணுக்கருவும் மோதுகின்ற எறி துகளும் (நியூட்ரான்) தத்தம் இயக்கவாற்றலைப் பகிர்ந்துகொள்கின்றனவே தவிர, மற்றெவ்விதமான கருமாற்றத்தையோ அல்லது கருச் செயலீட்டையோ நிகழ்த்துவதில்லை. மோதுகின்ற நியூட்ரான்கள் தம் இயக்கவாற்றலில் ஒரு பங்கை இழந்துவிடுகின்றன. இத்தகைய மோதல்களில் அதிகத் திசை வேகமுடைய நியூட்ரான்களின் திசைவேகம் குறைந்துவிடுகின்றது. ஊடக அணு குறைந்த நிறை உடையதாக இருந்தால் மோதுகின்ற நியூட்ரான்களிடமிருந்து அதிக ஆற்றலையும், அதிக நிறை உடையதாயின் குறைந்த அளவு ஆற்றலையும் பகிர்ந்து கொள்கிறது. எனவே, அணு எண் குறைவாக உள்ள இலேசான தனிமங்களை அதிகத் திசை வேகமுடைய நியூட்ரான்கள் தாக்கினுல், இந்த மீட்சியுறு மோதலில் அவற்றின் திசைவேகங்கள் மிகுதியாகக் குறைந்துவிடுகின்றன. நீர், கனநீர், பாரபின் கிரோபைட் போன்ற ஊடகங்களின் வழியாக அதிகத் திசை வேகம் கொண்ட நியூட்ரான்கள் செலுத்தப்பட்டால், அவற்றின் திசைவேகங்கள் குறைந்துவிடுகின்றன. இத் தத்துவத்தைக் கொண்டே, அணு உலைகளில் மேற்கூறிய பொருள்களைத் தனிப்பான்களாக (moderators) பயன்படுத்துகின்றனர். இதனைப் பின்புக் காண்போம்.

மீட்சியுரு மோதலில் எறி துகளின் இயக்க ஆற்றலின் ஒரு பகுதியை மோதலுக்குட்பட்ட கரு பகிர்ந்துகொள்கிறது. இவ்வாற்றலைத் தன்னிடம் ஈர்த்துக்கொண்ட பின், அக் கரு தன் ஆற்றலின் அடிமட்டத்திலிருந்து செயலூக்கம் பெற்று அதிக

அளவு ஆற்றல் மட்டத்தைப் பெறுகிறது. இத்தகைய மோதல்கள் பெரும்பாலும் கனமான தனிமங்களில்தான் நிகழ்கின்றன.

கனமான தனிமங்களில் ஏற்படும் மீட்சியுரு மோதலினால் அதிகத் திசை வேகமுடைய நியூட்ரான்களின் திசை வேகத்தைக் குறைத்து அவற்றை வெப்ப நியூட்ரான்களாக மாற்ற முடியுமென்றாலும், இச் செயலீட்டுடன், வேறுபல செயலீடுகளும் நிகழக்கூடுமாதலால், நியூட்ரான்களின் திசைவேகங்களைக் கணிக்கப் பெரும்பாலும் மீட்சியுறு மோதல்கள்தான் பயன்படுத்தப்பட்டுவருகின்றன. எனவே, அணு உலைகளில் தனிப்பான்களாகப் பயன்படுத்தப்படும் தனிமங்களுக்குக் கருச் செயலீடுகளுக்கான முகப் பரப்பு (crass section) குறைவாகவும், மோதலுக்குள்ளான முகப் பரப்பு அதிகமாகவும் இருக்கின்றன. இவை பெரும்பாலும் இலேசான தனிமங்களாகத்தான் இருக்க முடியும்.

6·6. நியூட்ரான்களின் ஈர்ப்பு

நியூட்ரான்கள், கருக்களால் ஈர்க்கப்படும்பொழுது பல கருச் செயலீடுகள் நிகழ்கின்றன. அவற்றுள் முக்கியமான சில செயலீடுகளை இங்குக் காண்போம்.

(i) α கதிர்கள் வெளிவரும் செயலீடுகள் (n, α).

இலேசான தனிமங்களில் அதிகத் திசைவேகமுடைய நியூட்ரான்களும் மோதுகின்றபொழுது ஏற்படுகின்ற செயலீட்டிலிருந்து α கதிர்கள் வெளிவருகின்றன. எடுத்துக்காட்டாக லிதியம் $_3Li^6$ கருவோடு குறைந்த திசைவேக நியூட்ரான்கள் மோதுகின்றபொழுது α துகள்கள் வெளியேறுகின்றன.

$$_3Li^6 + {_0n^1} \rightarrow {_2He^4} + {_1H^3} + Q \quad \dots \quad (6\cdot12)$$

இச் சமன்பாட்டில் Q என்பது செயலீட்டின்போது வெளியிடப்படும் ஆற்றலைக் குறிக்கின்றது. இவை 'ஆற்றல் வெளியிடு செயலீடுகள்' (Exoergic reactions) என அழைக்கப்படுகின்றன.

(ii) புரோட்டான்கள் வெளிவரும் செயலீடுகள் (n.p.)

அதிகத் திசைவேகமுடைய நியூட்ரான்கள் நைட்ரஜன் போன்ற தனிமங்களைத் தாக்குகிறபொழுது புரோட்டான்கள் வெளிவருகின்றன. எடுத்துக்காட்டாகக் கீழ்க்கண்ட செயலீட்டினைக் காண்க.

$$_{7}N^{14} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{6}C^{14} + {}_{1}H^{1} \quad \ldots \quad (6{\cdot}13)$$

இவை பெரும்பாலும் ஆற்றல் ஏற்புச் செயலீடுகளாகத்தான் **(Endoergic reactions)** இருக்கமுடியும்.

(iii) γ கதிர்கள் வெளிவரும் செயலீடுகள் (n, γ)

இவ் வகைச் செயலீடுகளில் மோதலுக்குள்ளாகும் நியூட்ரான்கள் அணுக்கருவினுல் உட்கவரப்பட்டு அணுவின் மற்ருேர் ஐசோடோப்பை உண்டாக்கும். எடுத்துக்காட்டாக,

$$_{79}Au^{197} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{79}Au^{198} + \gamma \quad \ldots \quad (6{\cdot}14)$$

அதாவது 197 அ. நி. எண் உடைய தங்க அணுக்கரு நியூட்ரானை உட்கவர்ந்துகொண்டு γ கதிரை வெளிவிடுகின்றது. தங்கம் அதன் மற்ருேர் ஐசோடோப்பான அ. நி. எண் 198 உடைய அணுவாக மாறுகிறது.

(iv) (n, $2n$) செயலீடுகள்.

இச் செயலீடுகளில் கரு ஒரு நியூட்ரானை உட்கவர்ந்து கொண்டு செயலீடு நிகழ்ந்த பின்னர், இரண்டு நியூட்ரான்களை வெளிவிடுகின்றது. எடுத்துக்காட்டாக, தாமிர அணுக்கரு ஒரு நியூட்ரானை உட்கவர்ந்துகொண்ட பிறகு இரு நியூட்ரான்களை வெளிவிடுகின்றது.

$$_{29}Cu^{63} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{29}Cu^{62} + 2{}_{0}n^{1} \quad \ldots \quad (6{\cdot}15)$$

(v) பிளவுச் செயலீடு (Fission)

கருச் செயலீடுகளில் பெரும்பாலும் புரோட்டான்கள், γ கதிர்கள், நியூட்ரான்கள்தான் வெளிவரும். மேலும், தாக்கப்பட்ட அணுக்கருவும் அதிக அளவு நிறைமாற்றம் அடைவதில்லை. ஆனல், சில நேரங்களில் சில கனமான தனிமங்களின் கருக்கள் நியூட்ரான்களைத் தம்பால் உட்கவர்ந்துகொண்டு, ஏறத்தாழ நிறையில் ஈடான இரு கருக்களாக உடைந்துவிடுகின்றன. இச் செயலீட்டை அணுக்கருப் பிளவு என்கிருேம். மிகப் பெரிய அளவில் ஆற்றல் கொடுக்கும் செயலீடாக இது இருப்பதால் இதைப் பற்றி நாம் விரிவாகப் படிப்போம்.

6·7 அணுக்கருப் பிளவு (Nuclear Fission)

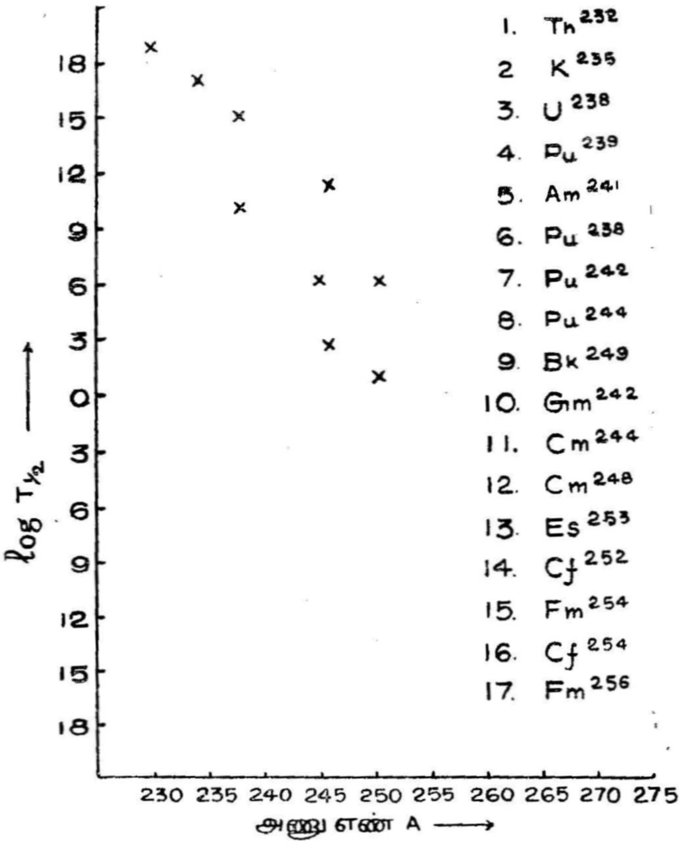
ஓர் அணுக்கரு ஏறத்தாழச் சம நிறையையுடைய இரண்டு துண்டங்களாக உடைபடுவதை 'அணுக்கருப் பிளவு' எனலாம். கருக்களில் இப் பிளவு தானகவும் நிகழலாம். வெளியிலிருந்து

ஆற்றல் பெற்றுத் தூண்டப்படவும் செய்யலாம். தானாக நிகழும் பிளவை 'தற்செயல் பிளவு' (spontaneous fission) என்றும் வெளித் தூண்டலினால் தோன்றும் பிளவைத் 'தூண்டப்பட்ட பிளவு' (induced fission) என்றும் அழைக்கலாம். தூண்டப் பட்ட பிளவினைக் கருச் செயலீடுகளில் ஒன்றாகக் கருத இடமிருக் கிறது.

(i) தற்செயல் பிளவு (spontaneous fission)

தற்செயலாக நிகழ்கின்ற α, β, γ கதிரியக்கங்களைத் தவிர, மற்றும் ஒரு தற்செயல் கதிரியக்கச் சிதைவு சோதனைகளினால் கண்டுபிடிக்கப்பட்டுள்ளது. இது α, β, γ கதிரியக்கங்களைவிட மிக வலிமை வாய்ந்தது எனலாம். இக் கதிரியக்கத்தில் ஓர் அணுக்கரு ஏறத்தாழச் சம நிறையுடைய இரு துண்டங்களாக உடைபடுவதோடன்றி, அதிக அளவில் நியூட்ரான்களும் வெளிப் படுத்தப்படுகின்றன. அதிக நிறை வாய்ந்த கருக்களில்தான் இத் தற்செயல் பிளவு நிகழ முடியும். இயற்கையில் ஏற்படும் α துகள் சிதைவு காரீயம் போன்ற தனிமங்களிலிருந்து நிகழ்வதுபோல, இத் தற்செயல் பிளவு தோரியம் தனிமம் முதல் நிகழ்கிறது எனலாம். தோரியம் Th^{232} தனிமத்திற்குத் தற்செயல் பிளவிற் கான அரைவாழ்வுக் காலம் 10^{21} ஆண்டுகளாக இருக்கலாம் எனக் கணிக்கப்பட்டிருக்கிறது. இக் காலம் மிகுதியாக இருப்ப தால் அதை அளப்பது மிகக் கடினம். எனினும், தனிமங்களின் அணு எண் அதிகமாக அதிகமாகத் தற்செயல் பிளவுக்கான அரைவாழ்வுக் காலம் குறைந்துகொண்டே வருகிறது. $_{92}U^{238}$ கருவிற்கு இது 6×10^{15} ஆண்டுகளாகவும், கியூரியம் $_{96}Cm^{244}$ (இது ஒரு புற யுரேனியத் தனிமம்) கருவிற்கு $1{\cdot}4\times10^{7}$ ஆண்டு களாகவும், ஃபெர்மியம் (இதுவும் ஒரு புற யுரேனியத் தனிமம்) கருவிற்கு 200 நாள்களாகவும் உள்ளது. (தோரியத்திலிருந்து ஃபெர்மியம் வரைக்கான தற்செயல் பிளவு அரைவாழ்வுக் காலங் களையும் அவற்றின் அணு எண் A-யையும் இணைத்து வரையப் பட்ட வரைப்படம் அடுத்த பக்கத்தில் காட்டப்பட்டுள்ளது.)

α, β, γ கதிரியக்கங்களுக்கான அரைவாழ்வுக் காலங்கள், Z அதிகரிக்கும்பொழுது குறைகின்ற வீதத்தைக் காட்டிலும், தற் செயல் பிளவு அரைவாழ்வுக் காலங்கள் Z-ஐப் பொறுத்து அதி வேகமாக குறைகின்றது எனலாம். இதனால்தான் 103-க்கு மேல் அணு எண் கொண்ட தனிமம் இயற்கையில் நிலைத்திருப்பதில்லை என்று கொள்ளலாம்.



படம் 6·4
அணு எண் *A*, *Z* = 90-லிருந்து *Z* = 100 வரை உள்ள தனிமங்களின் தற்செயல் பிளவுக்கான அரைவாழ்வுக் காலங்கள்

(ii) **தூண்டப்பட்ட பிளவு** (induced fission)

இதனை முதன்முதலாகக் கண்டறிந்தவர்கள் ஹான் (Hahn) ஸ்ட்ராஸ்மன் (Strassman) என்ற இரண்டு விஞ்ஞானிகளாவர். இவர்கள் 1939ஆம் ஆண்டு யுரேனியம் தனிமத்தை நியூட்ரான்களைக் கொண்டு தாக்கினர். இத் தாக்குதலால் யுரேனியத்தின் வேறோர் ஐசோடோப்பு உண்டாக்கக்கூடுமென்று எதிர்பார்த்தனர். ஆனால், அதற்கு மாறாகப் பேரியம்($_{56}Ba^{139}$) ஐசோடோப்பும்,

கிரிப்டான் ஐசோடோப்பும் கிடைத்தன. யுரேனியத்தின் அணு எண் 92. பேரியத்தின் அணு எண் 56 ஆகவும், கிரிப்டானின் அணு எண் 36 ஆகவும் இருந்ததால் யுரேனியக் கரு நியூட்ரான்களால் தாக்கப்பட்டபொழுது, பேரியம் கருவாகவும், கிரிப்பான் கருவாகவும் உடைந்திருக்க வேண்டும் என எண்ணினர். ஆனால், இச் செயலீட்டில், அவர்கள் எதிர்பார்த்ததற்கு முற்றிலும் மாறுன விளைவுகள் கிடைத்தமையால் தம் ஆராய்ச்சியின் முடிவை உடனே வெளியிட முன்வரவில்லை.

பல நாள்களுக்குப் பிறகு மைட்னர் (Meitner), ஃபிரிஷ் (Frish) என்ற இரு விஞ்ஞானிகள் யுரேனியத்தின் கரு நியூட்ரான்களால் தாக்கப்பட்டபொழுது அது கருத் துண்டுகளாகப் பிளவுறுகிறதெனவும், அவ் விரண்டில் பேரியம் ஒன்று எனவும் திட்டவட்டமாக அறிவித்தனர். 1940ஆம் ஆண்டு ஃபெலரோவ் (G. N. Flero) பெட்ரஷாக் (K. A. Petrgheck) என்ற இரு ருஷ்ய விஞ்ஞானிகள் தற்செயல் பிளவைச் சோதனைச் சாலையில் நிகழ்த்தினுர்கள்.

இப்போது அதிகத் திசைவேகம் கொண்ட γ கதிர்கள் நியூட்ரான்கள், புரோட்டான்கள், டியூட்ரான்கள், α துகள்கள் ஆகியவை கார்பன், நைட்ரஜன், ஆக்ஸிஜன், நியான் அயனிகள் ஆகியவற்றின் கருக்களோடு மோதிப் பிளவை உண்டாக்கக் கூடும் என்பது அறியப்படுகிறது. இப்பொழுது மிகவும் இலேசான தனிமங்களான லாந்தனேடு (Lanthenide) தனிமங்களையும் அதிக ஆற்றல் கொண்ட எறி துகள்களைக் கொண்டு தாக்கிப் பிளவுறச் செய்யலாம் எனக் கண்டுபிடித்திருக்கிறுர்கள்.

6·8. நியூட்ரான்களைக் கொண்டு 'கருப்பிளவு' உண்டாக்குதல்

குறைந்த திசைவேகங்கள் கொண்ட நியூட்ரான்கள் சில கருக்களைத் தாக்கும்பொழுது பிளவுறுகின்றன. யுரேனியம் 235 ஐசோடோப்புகள், வெப்ப நியூட்ரான்களைத் தன்னுள் கவர்ந்து கொண்டு பிளவுறுகின்றன. ஆனால், U^{238} ஐசோடோப்பு மிக வேகமான நியூட்ரான்களோடு மோதும்போதுதான் பிளவுறுகின்றது. ஏறத்தாழ இரட்டை அணு எண் (Even Z) ஒற்றை நியூட்ரான் எண் (Odd N) கொண்ட கருக்கள் மிகக் குறைந்த திசைவேகங்களுடைய நியூட்ரான்களாலும், இரட்டை அணு எண், இரட்டை நியூட்ரான் எண் கொண்ட கருக்கள் அதிகத் திசைவேகம் கொண்ட நியூட்ரான்களாலும் பிளவுறுகின்றன எனலாம்.

அட்டவணை 6·1

கருப்பிளவுறும் தனிமங்கள்

தாய் மூலகம்	Z	N	பிளவிற்கு வேண்டிய நியூட்ரான்களின் திசை வேகம்
$_{92}U^{233}$	இ	ஒ	குறைவுத் திசைவேகம்
	(இரட்டைப் படை)	(ஒற்றைப் படை)	
$_{92}U^{235}$	இ	ஒ	குறைவுத் திசைவேகம்
$_{92}U^{238}$	இ	இ	அதிகத் திசைவேகம்
$_{90}Th^{232}$	இ	இ	அதிகத் திசைவேகம்
$_{94}Pu^{239}$	இ	ஒ	குறைவுத் திசைவேகம்
$_{93}Np^{237}$	ஒ	இ	அதிகத் திசைவேகம்
$_{91}Pu^{232}$	ஒ	ஒ	குறைவுத் திசைவேகம்
$_{93}Np^{236}$	ஒ	ஒ	குறைவுத் திசைவேகம்

வெப்ப நியூட்ரான்களால் அணுக்கரு எவ்வாறு பிளவுறுகிறது என்பதைச் சிறிது கவனிப்போம். நியூட்ரான்கள் ஒரு யுரேனியக் கருவோடு மோதுவதாக வைத்துக்கொள்வோம். குறிப்பிட்ட ஒரு வெப்ப நிலையில் வாயுவின் மூலக் கூறு ஒன்று எந்த அளவு ஆற்றல் படைத்திருக்கின்றதோ அந்த அளவு ஆற்றல் படைத்துள்ள நியூட்ரான்களெல்லாம் 'வெப்ப நியூட்ரான்கள்' என்று அழைக்கப்படுகின்றன. இந்த நியூட்ரான்களின் ஆற்றல் அவை கருக்களால் ஈர்க்கப்படுவதனால் வெளிவரும் ஆற்றலைவிடக் குறைவு (*1* மி.எ.வோ.)

U^{235} அணுக் கருவின் பிணைப்பு ஆற்றலைப் பின்வருமாறு கணக்கிடலாம்.

$$_{92}U^{235}+{}_0n^1 \longrightarrow {}_{92}U^{236}$$

$$Q = 931[M(U^{235})+Mn-M(U^{236})]$$

$$= 931[235{\cdot}1170+1{\cdot}0090-236{\cdot}1191)$$

$$= 931(0{\cdot}0069) = 6{\cdot}4 \text{ மி. எ. வோ.}$$

எனவே, நியூட்ரான் ஈர்ப்பினால் கிடைக்கும் U^{236} அணுக்கரு 6·4 மி. எ. வோ. அளவிற்குச் செயலூக்கம் அடைகிறது. இவ்வாறே நியூட்ரான்கள் U^{238} கருவினால் ஈர்க்கப்பட்டு U^{239} கரு உண்டாகின்றபொழுது 4·8 மி. எ. வோ. அளவுக்குச் செயலூக்கம் அடையும் எனக் கணிக்கலாம். ஆனால், சோதனைகளின்படி U^{235} கருதான் வெப்ப நியூட்ரான்களை ஈர்த்துக்கொண்டு பிளவுறுகின்றதே தவிர U^{238} கரு அவ்வாறு பிளப்பதில்லை. எனவே, யுரேனியம் பிளவுறுதற்கு ஏறத்தாழ 5 அல்லது 6 மி.எ வோ. பயன் தொடக்க ஆற்றல் கொடுக்கப்படவேண்டுமென்பது புலனாகிறது. இவ் வாற்றலிலிருந்து பெறப்படும் விசை கூலும் விலக்கு விசையோடு சேர்ந்து கருத் துகள்களைப் பிணைக்கும் கரு விசையைச் சிறிது தளர்த்தி, கருவை அதிக அளவு நிலைத்தன்மை அற்றதாக்கிப் பிளவுறச் செய்கிறது எனலாம்.

6·9. அணுக்கருப் பிளவினின்றும் பெறப்படும் ஆற்றல்

கருப்பிளவிலிருந்து கிடைக்கும் ஆற்றலைத் தோராயமாகக் கணக்கிட, U^{234} கரு $(U^{235}+n)$ 118 அ. நி. எ. உள்ள இரு துண்டுகளாகப் பிளவுறுகிறதெனக் கொள்வோம். U^{236} கருவில் பிணைப்பின் ஆற்றல் ஏறத்தாழ 7·6 மி. எ. வோ. ஆகவும், 118 அ. நி. எ. கொண்ட கருக்களில் அவ் வாற்றல் 8·5 மி, எ. வோ. ஆகவும் உள்ளன. நியூக்ளியான்கள் ஒன்று சேர்ந்து அணுக் கருவாக மாறும்பொழுது கிடைக்கும் ஆற்றல் பிணைப்பு ஆற்றல்

ஆகும் என்ற அடிப்படையில், கருப்பிளவில் உண்டாகும் ஆற்ற லானது U^{236} கருவின் பிணைப்பு ஆற்றலுக்கும் 118 அ. நி. எ. உள்ள இரு கருக்களின் பிணைப்பு ஆற்றல்களின் கூட்டுத் தொகைக்கும் உள்ள வேறுபாடு எனக்கொண்டால்,

$Ef = U^{236}$ கருவின் மொத்தப் பிணைப்பு ஆற்றல்

$= -2 \times M^{118}$ கருவின் மொத்தப் பிணைப்பு ஆற்றல்

$$= 236\,(-7{\cdot}6) - \left\{ 2 \times 118(-8{\cdot}5) \right\}$$

$= 210$ மி. எ. வோ.

இக் கணக்கீடு தோராயமான கணக்கீடு என்றாலும் சோதனை மூலம் ஒரு கருப்பிளவினால் ஏற்படும் ஆற்றல் ஏறத்தாழ 200 மி. எ. வோ. என்பது கண்டுபிடிக்கப்பட்டுவிட்டது. இவ் வாற்றல் சாதாரண ஆற்றல் வெளியிடும் செயலீடுகளினின்றும் வெளிப்படும் பெரும அளவு ஆற்றலைப் போலப் பத்து மடங்கு உள்ளது. இது அதிக அளவு ஆற்றல் கொடுக்கும் ஒரு ஆற்றல் மூலமாக இருப்பதனால் மிக முக்கியம் வாய்ந்ததாக உள்ளது.

இந்த அளவிற்குச், சிக்கலான, அதிக ஆற்றல் வெளியிடும் செயலீட்டிலிருந்து இரண்டு பிளவுத் துண்டுகள் மட்டும்தான் கிடைக்கும் என எதிர்பார்த்தல் தவறு. இச் செயலீட்டில் பிளவுத் துண்டங்களைத் தவிர மற்றும் நியூட்ரான்களும், α கதிர்களும் வெளியிடப்படுகின்றன. பிளவிலிருந்து உண்டாகும் கருக்களின் நியூட்ரான்கள் புரோட்டான் தகைவை விட, பிளவுறும் யுரேனியம் கருவின் நியூட்ரான் புரோட்டான் மிகவும் அதிகம். எனவே, முதன்முதலில் பிளவிலிருந்து கிடைக்கும் துண்டங்களில் நியூட் ரான் மிகுதியாக இருப்பதால், நிலையான கருவிற்கான நியூட்ரான் புரோட்டான் தகவைக் கொடுப்பதற்கு அநேக β கதிரியக்கங் கள் தேவைப்படுகின்றன. அதாவது முதலில் கிடைக்கும் துண் டங்கள் β கதிரியக்கத்தினால் படிப்படியாகத் தேய்வுற்று, இறுதி யில் நிலையான துண்டங்களாக மாறிவிடுகின்றன. பிளவிலிருந்து கிடைக்கும் மொத்த இயக்க ஆற்றல், பிளவுத் துண்டங்கள் நியூட் ரான்கள் ஆகியவற்றின் இயக்க ஆற்றல்களாகவும் பிளவிலிருந்து கிடைக்கும் α கதிர்கள், β கதிர்கள் ஆகியவற்றின் ஆற்றல்களாக வும் பகிர்ந்துகொள்ளப்படுகின்றன. U^{235} கருவில் வெப்ப நியூட் ரான்களால் ஊக்குவிக்கப்படும் பிளவில் கிடைக்கும் சராசரி ஆற்றல் பங்கீடு கீழே அட்டவணையில் கொடுக்கப்பட்டுள்ளது.

அட்டவணை 6·2

தோராயப் பிளவு ஆற்றல் பங்கீடு

பிளவுத் துண்டங்களின் இயக்க ஆற்றல்	168·0 மி.எ.வோ.
பிளவு நியூட்ரான்களின் இயக்க ஆற்றல்	5·0 ,,
பிளவுப் பொருளில் β^- தேய்வு ஆற்றல்	4·8 ,,
β^- தேய்வினால் ஏற்படும் நியூட்ரினோ ஆற்றல்	10·0 ,,
உடனே உற்பத்தியாகும் γ கதிர் ஆற்றல்	4·6 ,,
பிளவுப் பொருள்களின்றும் கிடைக்கும் ஆற்றல்	6·9 ,,
மொத்த ஆற்றல்	199·3 மி.எ.வோ./பிளவு

6·10. பிளவுத் துண்டங்கள்

ஒரு அணுக்கரு பிளவுற்றபின் கிடைக்கும் இரு கருக்களை நாம் பிளவுத் துண்டங்கள் (fission fragments) என்கிறோம். இப் பிளவுத் துண்டங்கள் செயலூக்க நிலையிலிருந்து ஆற்றல் அடிமட்ட நிலைக்கு வருவதற்கு β துகள்களை வெளியேற்றுகின்றன எனக் கண்டோம். எடுத்துக்காட்டாக U^{238} கரு பிளவுறுதலைக் காண்போம்.

$$_{92}U^{238} + _0n^1 \longrightarrow _{57}Sb^{133} + _{41}Nb^{105} + _0n^1 \quad \ldots \quad (6\cdot16)$$

$$_{57}Sb^{133} \xrightarrow{\beta^-} _{52}Te^{133} \xrightarrow{\beta^-} _{53}I^{133} \quad \ldots \quad (6\cdot17)$$

$$_{53}I^{133} \longrightarrow _{54}Xe^{133} \xrightarrow{\beta^-} _{55}Cs^{133} \quad \ldots \quad (6\cdot18)$$

(நிலையான ஐசோடோப்)

இச் செயலீட்டில் நிலையற்ற ஆன்டிமனி β^- துகளை வெளியிட்டு முறையே டெலூரியம், ஐயோடின், செனன் என்ற தனிமங்களாக மாறி, இறுதியில் நிலையான ஐசோடோப்பான சீசியம்^{133} ஆக மாறுகிறது.

முதன்முதலில் கிடைக்கும் பிளவுத் துணடங்களைப் பிளவின் முதல்வினைப் பொருள்கள் எனவும், கதிரியக்கத் தேய்விற்குப்

பின்னர் கிடைக்கும் பொருள்களைப் பிளவு வினைப்பொருள்கள் (fission products) எனவும் அழைக்கலாம்.

பிளவுச் செயலீட்டில் ஏற்படும் பிளவுத் துண்டங்கள் இரண்டும் வெவ்வேறு இயக்க ஆற்றலைக் கொண்டிருக்கின்றன என்பது சோதனைமூலம் அறியப்பட்ட ஓர் உண்மை. இதிலிருந்து தாய் மூலம் பிளவுறும்போது சரி பாதியாக பிளவுறுவதில்லை என அறியலாம். பிளவுத் துண்டங்கள் வெவ்வேறு நிறைகளையும் வெவ்வேறு இயக்க ஆற்றல்களையும் கொண்டுள்ளன. எனவே, துண்டங்களின் நிறைகள் முறையே M_1, M_2 ஆகவும், அவற்றின் திசைவேகங்கள் முறையே V_1, V_2 ஆகவும் இருப்பின் உந்தம் மாறாக் கோட்பாட்டின்படி,

$$M_1 V_1 = M_2 V_2 \qquad \ldots \quad (6{\cdot}19)$$

கருக்களின் இயக்க ஆற்றல்கள் E_1, E_2 ஆக இருந்தால்,

$$E_1 = \tfrac{1}{2} M_1 V_1{}^2 ; \quad E_2 = \tfrac{1}{2} M_2 V_2{}^2 \qquad \ldots \quad (6{\cdot}20)$$

இவற்றிலிருந்து,

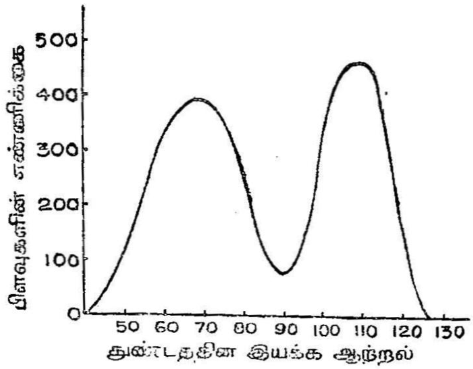
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{M_1 V_1{}^2}{M_2 V_2{}^2} = \frac{M_2}{W_1} \qquad \ldots \quad (6{\cdot}21)$$

(சமன்பாடு 6·19-லிருந்து) என்ற சமன்பாட்டைப் பெறலாம்.

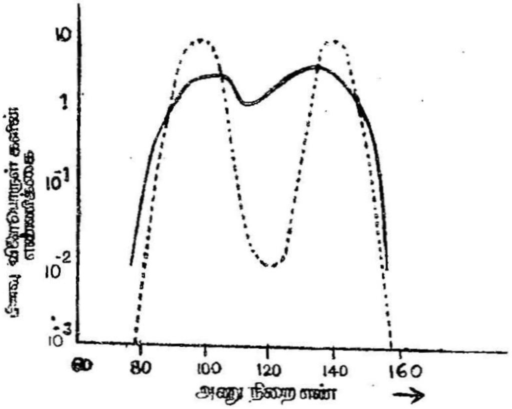
எனவே, பிளவுத் துண்டங்களின் இயக்க ஆற்றல்கள் அவற்றின் நிறைகளுக்கு எதிர் விகிதத்தில் அமைந்துள்ளன. இவ்வாற்றல் தகவு ஏறத்தாழ 1·5 ஆக இருக்கிறது. இதனால் அதிக நிறையுடைய பிளவுத் துண்டம் குறைந்தத் திசைவேகத்தையும், குறைந்த நிறையுடைய துண்டம் அதிகத் திசைவேகத்தையும் கொண்டுள்ளன என்பது புலனாகின்றது.

6·11 பிளவில் நிறைப்பகிர்வு

படம் 6·5 U^{235} கரு வெப்ப நியூட்ரான்களால் பிளவுறும்பொழுது ஏற்படும் இயக்க ஆற்றல் பகிர்வைக் காண்பிக்கிறது. பிளவுச் செயலீடுகளில் கிடைக்கும் துண்டங்கள் சரிநிகர் அளவுடையனவாக இருப்பின், அவற்றின் நிறைகளும் இயக்க ஆற்றல்களும் ஏறத்தாழச் சமமாக இருக்கும்.



படம் 6·5
கருவில் வெப்ப நியூட்ரான்கள் உண்டாக்கும் பிளவில் துண்டங்களின் இயக்க ஆற்றல் பங்கீடு



படம் 6·6
U^{235} கருவில் வெப்ப நியூட்ரான்கள் விளைவிக்கும் கருப்பிளவினால் ஏற்படும் துண்டங்களின் நிறைப்பகிர்வு

அதாவது M_1, M_2 ஆகியவற்றிற்கும், E_1, E_2 ஆகியவற்றிற்கும் சமமாக இருக்கும். ஆனால், படத்திலிருந்து E_2 ஆனது E_1-க்கு மிக வேறுபட்டிருக்கிறது என்பது தெரிகிறது. எனவே, துண்டங்களின் நிறைகளும் வெவ்வேறாக இருக்கவேண்டும் என்பது புலப்

படுகின்றது. படம் 6·5-லிருந்து பெரும்பாலும் கிடைக்கக்கூடிய பிளவு விளைப்பொருள்களின் நிறைத்தகைவை நாம் கண்டுபிடிக்க லாம். $E_1 = 75$ மி.எ.வோ. $E_2 = 105$ மி.எ.வோ. ஆக இருப்ப தால் M_2/M_1 [இலேசானது / கனமானது], தோராயமாக 0·7 உள்ளது. கருப்பிளவில் சராசரி இரண்டு நியூட்ரான்கள் உண் டாகின்றன என்று வைத்துக்கொண்டால், $M_1+M_2 = 234$ ($U^{235}+n$ பிளவு) ஆக இருக்கும். இப்பொழுது M_1 M_2 ஆகிய வற்றை இணைத்து இரண்டு சமன்பாடுகள் கிடைத்துள்ளன.

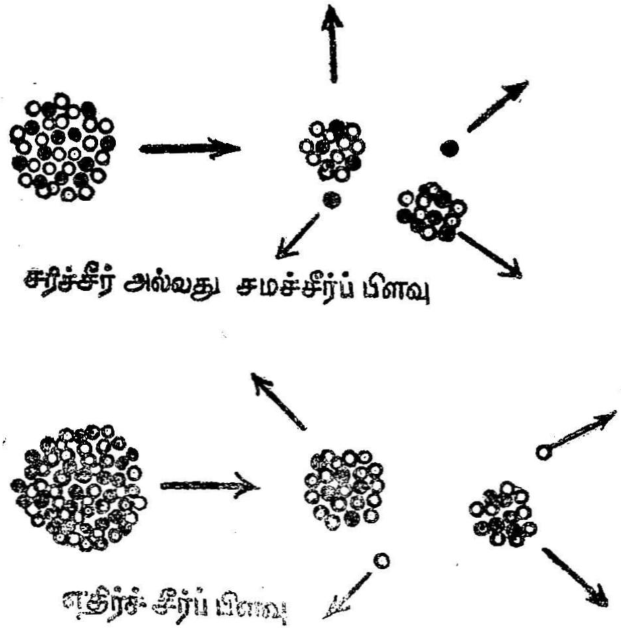
$$M_2/M_1 = 0{\cdot}7; \quad M_1+M_2 = 234.$$

இவற்றிற்குத் தீர்வுக் காணில் $M_2 = 97$ எனவும், $M_2 = 137$ எனவும் கிடைக்கிறது. இவற்றைப் படம் 6·6-ல் காட்டியுள்ள வரைபடத்துடன் இணைத்துப் பார்த்தால், பிளவுத் துண்டங் களுக்கான இரண்டு முகடு கொண்ட பகிர்வு வரைபடம் கிடைக்க வேண்டுமென்று தெரிகிறது. இவ் வரைபடத்தில் ஒரு பெருமம் $A = 137$-லும், மற்றொரு பெருமம் $A = 97$-லும் கிடைக்கின்றன. படம் 6·6 எதிர்பார்க்கப்படும் பெருமங்களைக் காட்டுகிறது.

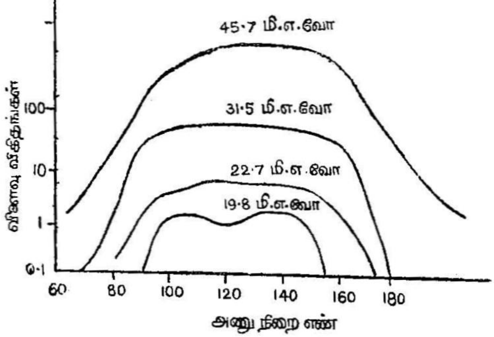
6·12. சமச்சீர்ப் பிளவும் எதிர்ச்சீர்ப் பிளவும் (Symmetric and Assymmetric Fission)

அணுக்கருப் பிளவு இரு வெவ்வேறான வழிகளில் நடை பெறலாம் என எதிர்பார்க்கப்படுகின்றது. இரண்டு துண்டங் களும் ஒரே நிறையுடையனவாக ஒரு வழியிலும், வெவ்வேறு நிறையுடைய இரு துண்டங்களாக மற்றொரு வகையிலும் நிகழ் கின்றன எனலாம். இவற்றுள் முதலாவது பிளவைச் 'சமச்சீர்' (symmetric fission) என்றும், மற்றப் பிளவை 'எதிர்ச்சீர் பிளவு' (assymmetric fission) என்றும் அழைக்கலாம். இரு நிகழ்ச்சி களும் ஒரே சமயத்தில் ஒன்றிற்கொன்று முந்திக்கொண்டு நிகழ் கின்றன.

மோதல் ஆற்றல் அதிகரிக்க அதிகரிக்க சமச்சீர்ப் பிளவு எதிர்ச்சீர்ப் பிளவைக் காட்டிலும் அதிக அளவில் நிகழ்கின்றது. Np^{237} கருவின் நிறை விளைவுப் பகிர்வு (mass-yield distribution curve) வரைபடம். படம் 6·8-ல் காட்டப்பட்டிருக்கின்றது. அதிக ஆற்றல் படைத்த α துகளைக் கொண்டு Np^{237} கருவைத் தாக்குகின்றபொழுது இரண்டு முகடுள்ள வரைபடம் கிடைப் பதற்குப் பதிலாக ஒரே முகடுடைய வரைபடம் கிடைக்கிறது. நாம் எதிர்ப்பார்ப்பதுங்கூட இதுவே எனலாம்.



படம் 6·7
சமச்சீர்ப் பிளவும், சரிச்சீர்ப் பிளவும்
இந்த இரண்டு பிளவுகளிலும்
2 நியூட்ரான்கள் வெளிவருவது கண்டுபிடிக்கப்பட்டுள்ளது.



படம் 6·8.
Np^{237} கருவில் 19·8 மி. எ. வோ 22·7, 31·5, 45·7 மி. எ. வோ. ஆற்றலுள்ள α துகள்களைக் கொண்டு மோதியதால் ஏற்படும் பிளவில் துண்டங்களின் நிறைப்பகிர்வு.

6·13. கருப்பிளவிலிருந்து கிடைக்கும் நியூட்ரான்கள்

பிளவுச் செயலீட்டின் ஒரு முக்கியத்துவம் என்னவென்றால், தாய்க்கரு பிளவுறும்போது ஒன்றுக்கு மேற்பட்ட நியூட்ரான்கள் வெளி வருவதேயாகும். இதற்குக் காரணம் கருக்களின் $n—p$ தகைவைச் சரிசெய்வதாக இருக்கலாம். கரு பிளவுற்றவுடனே தோன்றுகிற நியூட்ரான்களை 'உடனடி நியூட்ரான்கள்' (prompt neutrons) எனவும், பிளவிற்குப் பின்னர் கிடைக்கும் துண்டங்களின் β^- கதிரியக்கத்தினால் கிடைக்கும் நியூட்ரான்களைப் 'பின் தங்கிய நியூட்ரான்கள்' (delayed nuetrons) எனவும் அழைக்கின்றனர். கருப்பிளவிலிருந்து வெளிவரும் நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கையானது. பிளவுறும் கருவின் தன்மைகள், பிளவை உண்டாக்கும் நியூட்ரான்களின் திசைவேகம் ஆகியவற்றைப் பொறுத்தது. எடுத்துக்காட்டாக நடைமுறையில் பயன்படுத்தப் பட்டுவரும் யுரேனியம், புளூடோனியம் போன்ற கருக்களிலிருந்து வெளிவரும் நியூட்ரான்களின் சராசரி எண்ணிக்கை அட்டவணை 6·3-ல் கொடுக்கப்பட்டுள்ளது.

அட்டவணை 6·3

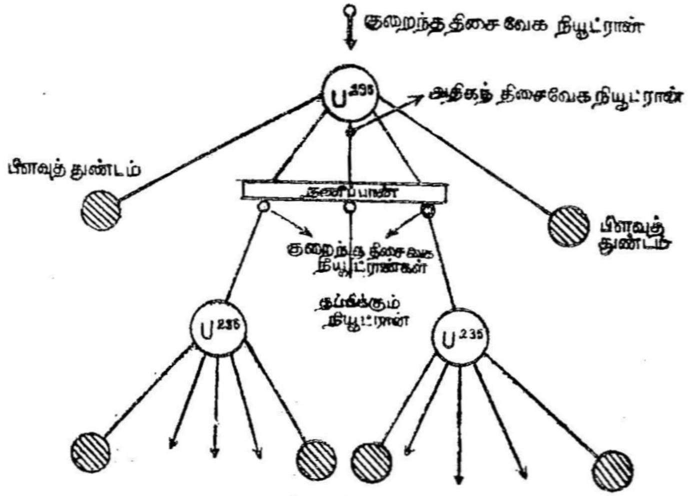
யுரேனியம்	235	2·43
புளூடோனியம்	239	2·89
யுரேனியம்	233	2·50

6·14. தொடர் வினைகள் (Chain Reactions)

மேலே கொடுக்கப்பட்டுள்ள அட்டவணையின்படி யுரேனியம் போன்ற தனிமங்கள் நியூட்ரான் துகள்களை உட்கவர்ந்து பிளவுறும்போது இரண்டுக்கும் மேற்பட்ட நியூட்ரான்களை வெளிவிடுகின்றன என்று அறிகிறோம். இந்த நியூட்ரான்கள் மற்ற அணுக் கருக்களோடு மோதி மேலும் பல பிளவு நிகழ்ச்சிகளை உண்டு பண்ணலாம். அவை ஒவ்வொன்றும் வேறு இரண்டு நியூட்ரான்களைத் தோற்றுவிக்கும். இவ்வாறே, இந் நிகழ்ச்சி தொடர்ந்து நடைபெற்று யுரேனியம் முழுவதையும் பிளவடையச் செய்யும். இத்தகைய நிகழ்ச்சி 'அணுக் கருத் தொடர்வினை' (nuclear chain reaction) என அழைக்கப்படுகிறது.

இத் தொடர்வினையை ஊக்குவித்து நெடியில் எல்லா யுரேனியக் கருக்களும் பிளவுறுமாறு செய்யலாம். அவ்வாறு செய்வதால் நமக்கு ஆற்றல் அதிக அளவில் கிடைக்கிறது. இத் தத்து

வத்தைக் கொண்டுதான் அணுக் குண்டு தயார் செய்யப்பட்டது. இத் தொடர் வினையைக் கட்டுப்படுத்தி நீண்ட காலத்திற்கு நிகழு மாறும் செய்யலாம். இத்தகைய சாதனத்தை நாம் 'அணு உலை' (atomic reactor) என்கிறோம். இதைப் பற்றி விரிவாகப் பின்புப் பார்ப்போம்.



படம் 6·9
தொடர்வினை

6·15. பிளவுச் செயலீட்டின் கோட்பாடு ஆற்றலை ஒட்டிய ஆராய்வு

M (A, Z) நிறைகொண்ட ஓர் அணுக்கரு பிளவுறுகிறது என வைத்துக்கொள்வோம். பிளவிற்குப் பின் ஏற்படும் துண்டங்களின் நிறைகள் முறையே, $M_1 (A_1 Z_1)$. $M^{\cdot}(A_2, Z_2)$ என்றும் கொள்வோம். பிளவுச் செயலீட்டிலிருந்து விளையும் ஆற்றல்,

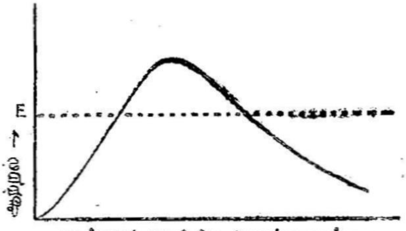
$$E_0 = [M(A, Z) - M(A_1, Z_1) - M(A_2, Z_2)] \quad \ldots \quad (6{\cdot}22)$$

ஆகும்.

E_0-ன் மதிப்பு சுழியைவிட அதிகமாக இருந்தால், ஆற்றலைப் பொறுத்தவரைக் கருவானது தானாகவே பிளவுறும். இவ்வாற்றலின் மதிப்பை வைஸாக்கரின் நிறைக்கோவையில் (Weizsacker's mass formula) பெறலாம். இது பிளவுத்

துண்டங்களின் நிறையையும் மின் விட்டத்தையும் பொறுத்திருக்கும். பிளவு சமச்சீர்ப் பிளவாக இருப்பின் அதாவது அணு நிறை எண் A_1 அணு எண் Z கொண்ட கருப்பிளவினால் $A/_2$ நிறையும், $Z/_2$ மின்னூட்டமும் கொண்ட இரு துண்டங்கள் கிடைத்தால், E_0-ன் மதிப்பு நேர்க்குறி உடையதாக இருக்கும். இதிலிருந்து தனிமங்கள் எல்லாம் தாமாகவே சமச்சீர்ப் பிளவுறல் பெறலாம் என்பது பெறப்படுகிறது. எனினும், கருக்களில் பெரும்பாலும் தற்செயல் பிளவு தானாக நிகழ்வதில்லை. பிற துகள்களை உட்கவர்ந்த பின்பே பல கருக்கள் பிளவுறுகின்றன என்பதை முன்பே கண்டோம்.

தனிமங்கள் தாமாகவே பிளவுறாததற்குக் காரணம், அவற்றின் அணுக் கருக்கள் கொண்ட மின்னழுத்த அரணே என்று கூறலாம். பிளவினால் துண்டங்கள் ஏற்படினும், அவை கருவிலிருந்து வெளியேறாவண்ணம் இம் மின்னழுத்த அரண் தடுத்துவிடுகிறது. இவ் வரணின் பெரும அளவு, ஆற்றலைக் கரு உட் கொண்டால்தான் அது பிளவுற முடியும் என்பதைக் குறிக்கிறது.



படம் 6·10.
கூலூம் மின்னழுத்த அரண்

குறிப்பாகச், சமச்சீர்ப் பிளவில் இரண்டு துண்டங்களும் கோள வடிவமுடையவை என்றும், அவை ஒன்றையொன்று தொட்டுக்கொண்டிருக்கின்றன என்றும் கொண்டோமானால்,

$$\left.\begin{array}{l}\text{துண்டங்களிடையே செயல்படும் கூலும்}\\ \text{விலக்கு விசையினால் கிடைக்கக் கூடிய}\\ \text{நிலை ஆற்றல்}\end{array}\right\} = \frac{\left(\frac{Ze}{2}\right)^2}{2R} \quad \ldots (6{\cdot}23)$$

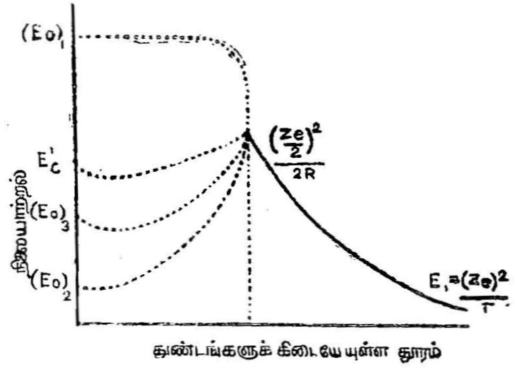
இங்கு Z_e என்பது பிளவுறும் கருவின் மின்னூட்டத்தையும், R என்பது பிளவுத் துண்டங்களின் ஆற்றல்களையும் குறிக்கின்றன. மேலே கொடுக்கப்பட்டுள்ள (சமன்பாடு 6·23) தொடர் இரண்டு பிளவுத் துண்டங்களுக்கிடையே பெரும ஆற்றலைக் கொடுக்கிறது

அதை Ec' எனக் கொள்வோம். துண்டங்களுக்கு இடையே உள்ள தொலைவு = 'γ' ஆனல் இதன் மதிப்பு

$$Ec = \frac{(Ze2/2)}{\gamma} \qquad \dots \quad (6\cdot 24)$$

என ஆகும்.

'γ'-ன் மதிப்பு ஈற்றிலிருந்து குறைந்துகொண்டேவந்தால், இவற்றின் நிலையாற்றல் படம் 6·11-ல் காட்டியிருப்பது போல அதிகரித்துக்கொண்டே வரும். $\gamma = 2R$ ஆக இருக்கும்பொழுது $Ec' = (Ze/_2)^2/2R$ என்றிருக்கும். இடைவெளித் தொலைவு $2R$-க்குள் குறைவாக இருக்கும்பொழுது ஆற்றல்கள் வெவ்வேருக



படம் 6·11.
அணுக்கருப் பிளவுக்கான நிலையாற்றல் வரைபடம்

இருப்பதைக் காணலாம். இவை வெவ்வேறு கோடுகளால் படத்தில் காட்டப்பட்டுள்ளன. இதில் மூன்று நிகழ் திறன்கள் காட்டப்பட்டுள்ளன.

(i) E_0-ன் மதிப்பு $(E_0)_1$ ஆக இருக்கும்பொழுது, E_0'-ன் மதிப்பைவிட அதிகமாக இருந்தால் தற்செயல் பிளவு ஏற்படுவதற்கான நிகழ் திறன் அதிகமாக இருக்கும். இது பெரும்பாலும் A-ன் மதிப்பு 250-க்கு அதிகமாக உள்ள கருக்களில்தான் நிகழும். சில புற யுரேனியத் தனிமங்களில் தற்செயல் பிளவு நிகழ்கிறது என்பதை நாம் முன்பே கண்டோம்.

(ii) E_0-ன் மதிப்பு $(E_0)_2$ ஆக இருக்கும்பொழுது, அதாவது $(E_0)_2$, E_c'-ஐ விட 50 மி. எ. வோ. குறைவாக இருக்கும்பொழுது

தற்செயல் பிளவுகள் நிகழ்வதில்லை. பிளவினை உண்டாக்க, ஓரளவுப் பயன் தொடக்க ஆற்றல் (threshold energy) கொடுக்கப்பட வேண்டும். இது $A = 120$ அ.நி.எ. உள்ள அணுக்கருக்களில் நிகழக்கூடும்.

(iii) E_0-ன் மதிப்பு $(E_0)_3$ ஆனால், அதாவது E_c'-யை விட ஒரு சில மி.எ.வோ. (6 மி.எ.வோ. குறைவாக இருந்தால், கருவில் பிளவினைத் தூண்டுதல் மிக எளிதாகின்றது. குறைந்த திசை வேகங்கள் கொண்ட நியூட்ரான்கள், குறைந்த அளவு ஆற்றல் படைத்த போட்டான்கள் இவை சில கருக்களில் மோதுகின்ற பொழுது கருக்களால் உட்கவரப்பட்டுக் கருக்களின் ஆற்றல் அதிகமாகின்றது. எனவே, பிளவு ஏற்படும் நிகழ்திறன் அதிகமாகிறது. இதைத் தவிர துகள்களை உட்கவருவதால் செயலூக்க நிலையிலிருக்கும் கருவிலிருந்து துண்டங்கள், குவான்டம் கொள்கையின்படி மின்னூட்ட அரணை ஊடுருவக்கூடுமாதலால், சிற்சில சமயங்களில் மின்னூட்ட அரணைவிடக் குறைந்த ஆற்றல் பெற்றும் கருப்பிளவு ஏற்படலாம்.

மாதிரிக் கணக்கு 1

வெப்ப நியூட்ரான்களை உட்கவர்ந்தது Th^{232} கரு பிளவுறுவதில்லை. பிளவிற்கு வேண்டிய 5·5 மி.எ.வோ. பயன் தொடக்க ஆற்றலைவிட Th^{233} கருவின் பயன்தொடக்க ஆற்றல் ஓரளவு குறைந்திருக்கிறது என நிரூபிக்க.

$$M(Th^{232}) = 232{\cdot}1000$$
$$M(Th^{233}) = 233{\cdot}1126$$

Th^{232} — $232{\cdot}1000$ அ. நி. எ.

$+$ — $1{\cdot}009$

$233{\cdot}1090$ அ. நி. எ.

Th^{233} — $233{\cdot}1126$ அ. நி. எ.

இவை இரண்டிற்குமுள்ள நிறைவேறுபாடு $= 233{\cdot}1126$

$= 233{\cdot}1090$

$= 0{\cdot}0036$ அ. நி. எ.

$= {\cdot}0036 \times 931$ மி. எ. வோ.

$= 3{\cdot}352$ மி. எ. வோ.

இது பிளவிற்கு வேண்டிய பயன் தொடக்க ஆற்றலைவிடக் குறைவாய் உள்ளது.

மாதிரிக் கணக்கு 2

U^{235} கரு, குறைந்த திசை வேகமுடைய நியூட்ரானை உட்கவர்ந்து கீழ்க்கண்ட சமன்பாட்டின்படி பிளவுறுகின்றது. பிளவில் தோன்றும் ஆற்றலைக் கணக்கிடுக.

$$_{92}U^{235} + _0n \rightarrow _{42}Mo^{95} + _{57}La^{139} + _2on^1$$

விடை	$M(U^{235})$	=	235 116	அ. நி. எ.
	Mn	=	1·009	,,
	$M(Mo^{95})$	=	94·945	,,
	$M(La^{139})$	=	138·955	,,

இடப் பக்க மொத்தம்

U^{235} = 235·116

n = 1·009

236·125 அ நி.எ.

வலப் பக்க மொத்தம்

Mo^{95} = 94·945

La^{139} = 138·955

2n = 2 018

235·918 அ. நி. எ.

எனவே (பிளவுறும் கரு + நியூட்ரான்) நிறைக்கும் பிளவு விளைப் பொருள்களின் மொத்த நிறைக்கும் உள்ள வேறுபாடு

$$236{\cdot}125 - 235{\cdot}918 = 0{\cdot}207 \text{ அ. நி. எ.}$$

ஒரு அ. நி. எ. 931 மி. எ. வோ.

எனவே, பிளவிலிருந்து ஏற்படும் ஆற்றல்

$$= 0{\cdot}207 \times 931 \text{ மி. எ. வோ.}$$
$$= 194 \text{ மி. எ. வோ.}$$

6·16. கருப்பிளவும், கருவின் திரவத்துளி மாதிரி அமைப்பும்

அணுக்கருவும், திரவத்துளி ஒன்றும் எவ்வாறு அநேக பண்புகளில் ஒன்றையொன்று ஒத்திருக்கின்றன என்பதை முன்புப் பார்த்தோம். கருவின் திரவத்துளி மாதிரியமைப்பின்படி இரண்டு எதிர்ப்பு விசைகள் ஒன்றையொன்று சரியீடு செய்வதனல்தான் கரு உறுதிநிலையில் உள்ளது என்று கண்டோம். இவ் விசைகளில் முதலாவது கருவிலுள்ள புரோட்டான்களிடையே செயல்படும் கூலும் விலக்குவிசையானது, கருவிலுள்ள புரோட்டான்களின் எண்ணிக்கை அதிகமானலோ, அல்லது

அவற்றிற்கிடையேயுள்ள தொலைவு குறைந்தாலோ இவ் விலக்கு விசை அதிகரிக்கும். ஒவ்வொரு புரோட்டானும் எஞ்சிய $(Z-1)$ புரோட்டான்களில் விலக்கித் தள்ளப்படுகிறது. இவ் விலக்கு விசை கீழ்க்கண்டபடி $Z(Z-1)$-க்கு நேர்விகிதத்திலும், புரோட்டான்களின் தொலைவிற்கு எதிர் விகிதத்திலும் இருக்கும்.

$$\text{விலக்கு விசை} \propto \frac{Z(Z-1)}{d_{P-P}} \qquad \ldots \quad (6{\cdot}25)$$

கருவின் ஆரம் $A^{\frac{1}{3}}$-க்கு நேர்விகிதத்தில் இருப்பதாலும், ஆரம் துகளிடைத்தொலைவின் கூட்டுத் தொகைக்குச் சமமாக இருப்பதாலும் $d_{P-P} \propto A^{\frac{1}{3}}$.

Z-ன் மதிப்பு அதிகமாக அதிகரிக்க, $Z(Z-1)$-ன் மதிப்பு Z^2-க்கு ஏறத்தாழச் சமமாகிறது. எனவே, அதிக Z மதிப்பு உள்ள கருவிற்குச் சமன்பாடு (1), 'கூலும் விலக்கு விசை

$$\propto \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} \text{ என்றாகிறது.} \qquad \ldots \quad (6{\cdot}26)$$

கருக்களில் உள்ள ஈர்ப்புவிசை, அருகில் இருக்கும் இரண்டு கருத்துகள்களுக்கிடையே செயல்படும் ஈர்ப்பு விசையினால்தான் ஏற்படுகின்றது. கருவின் மேற்பரப்பில் இருக்கும் நியூக்ளியான், கருவின் உள்ளடங்கிய நியூக்லியானைப் போல அதிக நியூக்லியான்களால் சூழப்படுவதில்லையாகையால், அதிக அளவு பிணைப்பு விசைக்குள்ளாவதில்லை. எனவே, அதிக அளவு பிணைப்புவிசை தேவைப்படுமானால், கருத்துகள்கள் பெரும்பாலும் கருவில் உள்ளடங்கியே இருத்தல்வேண்டும். இதிலிருந்துதான் அணுக்கருவும் திரவத்துளி ஒன்றும் ஒரே பண்புகளைப் பெற்றிருக்கின்றன என எண்ணவேண்டியிருக்கிறது. எவ்வாறு திரவத்துளி ஒன்றில் 'பரப்பு இழுவிசை (surface tension), துளி குறைந்த பரப்புடைய கோளமாக உருவெடுக்கத் துணைபுரிகின்றதோ, அவ்வாறே கருவிலும் இந்தப் பரப்புப் பற்றிய விசைக்கருவைக் கோள வடிவம் உடையதாக ஆக்குகிறது. இந்தப் பரப்புவிசை கோள வடிவுடைய கருவின் மேற்பரப்பிற்கு நேர்விகிதத்தில் அமையும்.

கருவின் மேற்பரப்பானது கரு ஆரத்தின் இரு மடிக்கு நேர்விகிதத்தில் அமைதலால், கருவின் ஈர்ப்பு விசை

$$\propto A^2/3 \qquad \ldots \quad (6{\cdot}27)$$

இந்த இரண்டு விசைகளின் தகைவு, திரவத்துளி போன்ற

கருவின் உறுதியிலாத் தன்மைக்கு ஓர் அளவாக அமைகிறது. உறுதியிலாத் தன்மை

$$\alpha \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} \times \frac{1}{A^{\frac{2}{3}}} = \frac{Z^2}{A} \qquad \ldots \quad (6{\cdot}28)$$

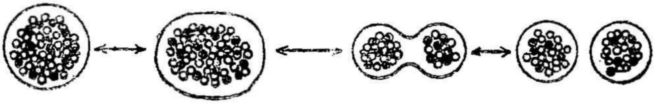
மேற்கண்ட சமன்பாட்டின்படி கனமான தனிமங்களில் Z^2-ன் மதிப்பு A-ன் மதிப்பைவிட அதிகமாக அதிகரிப்பதனால் கருவின் உறுதிநிலை குறைந்துவிடுகிறது. அதாவது இத் தனிமங்களில் கூலும் விலக்கு விசையானது கரு ஈர்ப்பு விசையைவிட அதிக மாகிறது. கரு இரண்டு துண்டங்களாகப் பிளவுறுகின்றபொழுது இந்த விலக்குவிசை குறைகிறது எனலாம். இப்பொழுது கரு விசையும் உடன் குறைந்தபோதிலும் இது கூலும் விசையை விட அதிகமாகவே உள்ளது. இதனைத் தவிர்த்துப் பிளவுத் துண்டங்கள் 'கூலும் மின்னழுத்த அரணையும்' 'கடக்கவேண்டி யிருக்கிறது. பெரும்பாலும் Z^2/A-ன் மதிப்பு 35-க்கு அதிகமா கின்றபொழுது கருப்பிளவு ஏற்படுகிறது எனலாம்.

கருக்களில் நிகழும் பிளவைக் கொள்கைமுலம் விளக்க, 1939ஆம் ஆண்டு, நீல்ஸ் போர் (Neils Bohr) J. ஜான்வீலர் என்ற இரு விஞ்ஞானிகள் கருவின் திரவத்துளி மாதிரியை அடிப்படையாகக் கொண்ட ஒரு கோட்பாட்டினை வெளி யிட்டனர்.

கோள வடிவம் கொண்ட ஒரு திரவத்துளி ஆற்றலை உட் கொள்ளும்பொழுது தன் வடிவத்தில் சிறு மாறுதல்கள் அடை கிறது. ஆனல் இம் மாறுதல் அதிக நேரம் நிலைப்பதில்லை. பரப்பு இழு விசையினல் மீண்டும் கோள உருவை அடைகிறது. கரு தன் சுய உருவை அடைந்தவுடனே, இம் மாறுதல் நின்று விடுவதில்லை. மற்றும் வேறு திசையில் கோளத்தினின்றும் உரு மாற்றம் அடைந்து சிறிது நேரத்திற்குப் பின்னரே கோள வடி வத்தை அடைகிறது. அதாவது, கோள வடிவமுள்ள திரவத் துளியின் பரப்பு, மாறி மாறிச் சுருங்கி நீள்கிறது. இத்தகைய உருமாற்றம் படத்தில் காட்டப்பட்டிருக்கிறது. இந்த உரு மாற் றம் ஒரு வரம்பிற்கு மேற்பட்டால், இது சிறு துளிகளாகச் சிதறு கிறது. இதை ராலே (Lord Raleigh) என்ற விஞ்ஞானி முன்பே அறிந்திருந்தார். அணுக்கருவும் திரவத் துளியைப் போல வெளியி லிருந்து வருகின்ற ஒரு துகளை உட்கவர்ந்து உருமாற்றமடைந்து இறுதியில் பிளவுறுகிறது எனலாம்.

அணு எண் அதிகமுடைய கருக்களில் கூலும் எதிர்ப்பு விசை அணுக்கரு விசையை விட அதிகமாக இருப்பதனல் தன்னிச்சை

யாகக் கரு கோள வடிவத்திலிருந்து சிறிது உருமாற்றம் அடைகிறது.



படம் 6·12
பிளவிற்கு வழி உண்டாகும் திரவத்துளி மாதிரியமைப்பின் பரப்பு அலைகள்

இவ்வாறு உருமாற்றம் அடைந்த கன மூலகக் கருவை நியூட்ரான்கள் தாக்குகின்றபோது, அவை கருவினால் உட் கவரப்படுகின்றன. இவ்வித உட்கவர்ச்சியினால் உண்டாகும் கூட்டுக் கரு (compound nuclei) இன்னும் உருமாற்றம் அடைந்து உறுதி நிலையற்றதாகிவிடுகிறது. பரப்பு மாறி மாறி விரிவடைந்து சுருங்குவதால், கருவில் 'பரப்பு அலைவுகள்' (surface oscillations) உண்டாகின்றன. ஒரு வரம்பிற்குமேல் கருவானது உருமாற்றமடைந்தபொழுது, புரோட்டான்களிடையே செயல்படும் மின் விலக்கு விசை கருவை இரண்டாகப் பிளக்கிறது.

கனமான தனிமங்களில் பிளவை உண்டாக்கும் 'பயன் தொடக்க ஆற்றல்' கணக்கிடப்பட்டிருக்கிறது. U^{236} தனிமத்திற்கு($U^{235}+n$) ஏறத்தாழ 5·5 மி.எ. வோல்ட்டுகளும், U^{239} கருவிற்கு ($U^{239}+n$) 7 0 மி. எ. வோல்ட்டுகளும் பயன் தொடக்க ஆற்றல்களாகும். மேற்கண்டவாறு, கருவின் திரவத் துளி மாதிரியான அமைப்பு சமச்சீர்ப் பிளவை விளக்குகிறதேயன்றி, எதிர்ச்சீர்ப் பிளவை விளக்கவில்லை. நடைமுறையில் பெரும்பாலும் எதிர்ச்சீர்ப் பிளவுகள் தாம் நிகழ்கின்றன.

6·17. அணு உலைகள்

(அ) அணுக்கரு ஆற்றல் சாதனங்கள் :

ஆதி காலந்தொட்டு மனிதன் தனக்கு வேண்டிய ஆற்றலைத் தனக்குப் புறம்பே உள்ள ஆற்றல் மூலங்களிலிருந்து பெற்று வந்திருக்கிறான். ஏறத்தாழ 1942ஆம் ஆண்டுவரை, எல்லா வகை ஆற்றல்களும் சூரியனிடமிருந்துதான் கிடைத்திருக்கிறது என்று கூறுவது மிகையாகாது. மனிதனின் உணவும், எரிபொருளும் சூரிய ஒளியால் நிகழும் தாவரங்களின் ஒளிச் சேர்க்கையினால் கிடைப்பவையே. நீரிலிருந்தும், காற்றிலிருந்தும் நாம் பெறும் ஆற்றல்களும் பரிதியின் வெப்பத்தின்மூலம் கிடைக்கும் ஆற்றல்களே. பரிதியின் ஆற்றலும் ஒருவகை அணுச் செயலீட்டி

லிருந்து கிடைக்கின்ற ஆற்றலே. இதை நாம் பின்னர்க் கவனிப் போம். 1942ஆம் ஆண்டு டிசம்பர் மாதத்தில் சிகாகோ பல்கலைக் கழகத்தில் நிறுவப்பட்ட அணு உலையிலிருந்துதான் உலகிற்குப் புதியதொரு 'ஆற்றல் மூலம்' கிடைத்தது எனலாம்.

நாம் இப்பொழுது கருப்பிளவிலிருந்து ஆற்றல் பெறுவது எவ்வாறு எனக் காண்போம்.

(ஆ) பிளவுச் செயலீடு :

ஒரு கனமான தனிமத்தின் கரு இரு துண்டங்களாகப் பிளவுறுகிறபொழுது, அதிக அளவு ஆற்றல் வெளிப்படுகிறதென்று கண்டோம். பிளவின்போது துண்டங்களைத் தவிர ஒரு சில நியூட்ரான்கள் வெளிவருகின்றன என்றும், ஒரு குறிப்பிட்ட சூழ்நிலையில் இவ்வாறு வெளியேறும் நியூட்ரான்கள் 'தொடர் வினை'யை ஏற்படுத்தவல்லன என்றும் கண்டோம். இச் செய லீட்டை நாம் இப்பொழுது கட்டுப்படுத்த முடியுமாதலால், இதைக் கொண்டு மிகுந்த அளவில் ஆற்றலைக் கொடுக்கும் ஒரு சாதனத்தை அமைக்கலாம். தொடர்ந்து ஆற்றல் தரும் வகையில் இப் பிளவுச் செயலீடு நிகழும் இச் சாதனத்தை நாம் 'அணு உலை' அல்லது 'அணுக் கரு ஆற்றல் சாதனம்' (nuclear reactor) என்கிறோம்.

ஒவ்வொரு கருப்பிளவிலிருந்தும் நமக்கு ஏறத்தாழ 200 மி. எ. வோ. ஆற்றல் கிடைக்கிறதென்றும், அதில் பெரும் பகுதி துண்டங்களின் இயக்க ஆற்றலாக மாறிவிடுகின்றது என்றும் பார்த்தோம். பிளவுத் துண்டங்களின் இயக்க ஆற்றல் அவை மற்றப் பொருள்களோடு மோதுகின்றபொழுது வெப்ப ஆற்றலாக மாறிவிடுகிறது. இத்தகைய வெப்ப ஆற்றலைக் கொண்டு நாம் போர்க் கப்பல்கள், நீர் மூழ்கிக் கப்பல்கள், மின்சார உற்பத்திச் சாதனங்கள் ஆகியவற்றை உண்டாக்கலாம். கருப்பிளவில் துண்டங்களின் இயக்கவாற்றலைத் தவிர, மற்ற ஆற்றல்களெல்லாம் அழிந்துபோயினும், எஞ்சியுள்ள 16·6 மி. எ. வோ. ஆற்றல் ஒரு பெரிய அளவு ஆற்றலாகியிருக்கிறது. ஒரு மில்லி கிராம் நிறையுள்ள U^{235} தனிமத்தில் $\frac{1}{235} \times 10^{-3}$ அல்லது 4×10^{-6} கிராம் அணுக்கள் உள்ளன. ஒரு கிராம் அணுவில் $6{\cdot}025 \times 10^{23}$ அணுக்கள் (அவகாட்ரோ எண்) உள்ளதால், ஒரு மி. கிராம் U^{235} தனிமத்தில்

$$(4 \times 10^{-6}) \times (6{\cdot}025 \times 10^{-23})$$

அல்லது 24×10^{17}

அணுக்கள் இருக்கின்றன. ஒரு மி. கிராம் U^{235} பிளவுறும்படி செய்யப்பட்டால் கிடைக்கும் வெப்ப ஆற்றல்

$= 24 \times 10^{17} \times 166$ மி. எ. வோ.

$= 4 \times 10^{20}$ மி. எ. வோ.

$= 4 \times 10^{20} \times 1{\cdot}6 \times 10^{-13}$ ஜூல்கள்

[$\because$ 1 மி.எ.வோ. $= 1{\cdot}6 \times 10^{-13}$ ஜூல்கள்]

$= 6{\cdot}4 \times 10^{7}$ ஜூல்கள்

நடைமுறையில் பயன்படுத்தப்படும் எந்த வெப்ப எந்திரமும், மூன்றில் ஒரு பங்கையாவது எந்திர ஆற்றலாக (mechanical energy) மாற்றும் சக்தி வாய்ந்தது. எனவே, ஒரு மில்லி கிராம் U^{235} தனிமம் ஏறத்தாழ 2×10^{7} அல்லது $[2 \times 10^{7}/10^{3} \times 3600]$ 5 கிலோவாட் மணிகள் (KWH) பயனுள்ள வேலையைச் செய்வதற்கான ஆற்றலைக் கொடுக்கும் எனக் கணக்கிடலாம்.

6·18. அணு உலையின் தத்துவம்

கொள்கையளவில் பல தனிமங்களில் கருப்பிளவுச் செயலீட்டை நிகழ்த்தமுடியும். இவற்றில் சில அதிக ஆற்றலை உட்கொண்டுதான் நிகழ்கின்றன. இச் செயலீட்டிற்கு அதிகத் திசைவேகமுடைய நியூட்ரான்களோ, அல்லது γ கதிர்களோ தேவைப்படுகின்றன. வேறு சில தனிமங்களில் ஒரு துகளின் பிணைப்பு ஆற்றலைக் கொண்டே (binding energy) பிளவை நிகழ்த்தமுடிகிறது. இத்தகைய தனிமங்களே பெரும்பாலும் அணு உலைகளில் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. அதிகத் திசை வேகமுடைய நியூட்ரான்களைவிட வெப்ப நியூட்ரான்கள் இத் தனிமங்களால் அதிக அளவில் உட்கவரப்படுகின்றன. ஆகையால் இத் தனிமங்களோடு வெப்ப நியூட்ரான்களை மோதச் செய்து பிளவை உண்டுபண்ணலாம். இவ் வகை அணுக்கருக்கள் அணு உலையின் எரிபொருள்கள் (reactor fuels) எனப்படுகின்றன. சில எரிபொருள்களின் தன்மைகள் அட்டவணை 6·4-ல் உள்ளன. இதில் 'ν' என்பது பிளவுச் செயலீட்டில் கிடைக்கும் நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கையாகும்.

கருப்பொருளில் உண்டாகும் எல்லா நியூட்ரான்களும் தொடர்ந்து பிளவை உண்டாக்கப் பயன்படுத்தப்படுவதில்லை. ஆகையால், பயனுள்ள நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கையைக் குறிக்க 'η' என்ற தகைவைப் பயன்படுத்தலாம். இது ஒரு நியூட்ரான் ஈர்ப்பினுல் ஏற்படும் நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கையைக் குறிக்கும். σ என்பது பிளவுச் செயலீட்டின் முகப்பரப்பைப்

பார்ன் (10^{-24} ச. செ. மீ.) என்ற அலகில் குறிக்கிறது. இயற்கையில் கிடைக்கும் யுரேனியம் கருவில் நியூட்ரான்கள் பிளத்தல் இன்றியே ஈர்க்கப்படுவதால், பிளவு முகப்பரப்பு மிகக் குறைந்திருக்கிறது. அட்டவணையில் கண்ட பொருள்களெல்லாம் அணு உலைகளில் எரிபொருள்களாகப் பயன்படவேண்டுமென்றால், அவை அதிக அளவில் கிடைப்பதற்கு வழி செய்ய வேண்டும்.

அட்டவணை 6·4

அணு உலையில் பயன்படுத்தப்படும் சில எரிபொருள்களின் தன்மைகள்

எரி பொருள்	ν	η	σf பார்ன்களில்
இயற்கையில் கிடைக்கும்			
$_{92}U$	2·55	1·34	4·2
$_{92}U^{235}$	2·46	2·33	5·80
$_{92}U^{238}$	2·54	—	533
$_{94}Pu^{239}$	2·88	2·70	750

இயற்கையில் கிடைக்கும் யுரேனியத்தில் 0·72 விழுக்காடு U^{235} ஐசோடோப்பாகவும், எஞ்சியது U^{238} ஐசோடோப்பாகவும் உள்ளது. இவற்றை அணு உலைகளில் பயன்படுத்துவதற்கு இரண்டு ஐசோடோப்புகளையும் தனித்தனியே பிரிக்கவேண்டும். இவ்வாறு ஐசோடோப்புகளைப் பிரிப்பதற்குப் பல முறைகள் கையாளப்படுகின்றன. விரவல் முறைகளால் (diffusion methods) இந்த ஐசோடோப்புகளைத் தனித்தனியே பிரிக்கலாம். ஆவி வடிவிலுள்ள யுரேனியக் கூட்டுப்பொருள் ஒன்றை ஒரு வழிச் சவ்வு (semi permeable membrane) ஒன்றின் வழியாகச் செலுத்தும்பொழுது, இலேசான ஐசோடோப்புகள் அதிகத் திசைவேகத்துடன் சவ்வு வழியே வெளிவருகின்றன. இவற்றைத் திரட்டினால் நமக்கு U^{235} ஐசோடோப்பும், பின் தங்கியவற்றைத் திரட்டினால் U^{238} ஐசோடோப்பும் கிடைக்கும். இவற்றைத் தவிரப் புற யுரேனியத் தனிமங்களில் முதலாவதான புளுடோனியமும், உலைகளில் பயன்படுகிறது. இத் தனிமம் கீழ்க்கண்ட சமன்பாடுகளின்படி பிளவுச் செயலீட்டின்மூலம் வளரவிடப்படுகிறது (breeded).

$$_{92}U^{238} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{92}U^{239} + \gamma \qquad \ldots (6{\cdot}29)$$

$$_{92}U^{239} \longrightarrow {}_{93}Np^{239} + {}_{-1}e^{0} + \qquad \ldots (6{\cdot}30)$$

$[T_{\frac{1}{2}}$ = 23 நிமிடங்கள்]

$$_{93}Np^{239} \longrightarrow {}_{94}Pu^{239} + {}_{-1}e^{0} + \bar{\nu} \qquad \ldots (6{\cdot}31)$$

$[T_{\frac{1}{2}}$ = 2·3 நாட்கள்]

இங்கு $\bar{\nu}$ என்பது ஆன்டி நியூட்ரினோவைக் (Anti Nuetrino). குறிக்கும். இச் சமன்பாடுகளின்படி U^{238} கருவானது முதன் முதலில் அதிகத் திசைவேகம் கொண்ட நியூட்ரான்களை உட்கொண்டு கதிரியக்கமுடைய U^{239} கருவாக மாறுகிறது. இது β^-துகளை வெளியிட்டுப் புற யுரேனியத் தனிமங்களில் ஒன்றான நெப்டியூனியம் கரு ஆகிறது. நெப்டியூனியமும் கதிரியக்கத்தால் மற்றொரு β^- துகளை வெளியிட்டுப் புளூடோனியமாக மாறுகிறது. இதுவும் ஒரு புற யுரேனியத் தனிமமே. இதன் அரைவாழ்வுக் காலம் 24,000 ஆண்டுகள். இக் கரு குறைந்த திசைவேகம் கொண்ட நியூட்ரான்களாலும், அதிகத் திசைவேகம் கொண்ட நியூட்ரான்களாலும் பிளவுறும் தன்மை வாய்ந்தது. மேலும், இக் கருவின் வாழ்வுக் காலம் அதிகமாக இருப்பதால், இதை அதிக அளவில் உற்பத்தி செய்து சேகரித்து வைத்துக்கொள்ளலாம்.

மேற்கண்ட எரிபொருள்களில் தொடர்ந்து தொடர்வினை நிகழ்வது உலையிலுள்ள நியூட்ரான்களைப் பொறுத்தது. இது கீழ்க்கண்ட வெவ்வேறு செயல்முறைகளைப் (processes) பொறுத்திருக்கிறது.

(அ) கருப்பிளவின்மூலம் நியூட்ரான்கள் உற்பத்தி செய்யப்படுதல்.

(ஆ) நியூட்ரான்கள் உலைக்கு வெளியே தப்பித்தல்—இது அணு உலையின் அமைப்பைப் பொறுத்து.

(இ) பிளவை உண்டுபண்ணாத நியூட்ரான்கள் உலையில் உட்கவரப்படுதல்.

(ஈ) பிளவை உண்டாக்காத நியூட்ரான்கள் எரிபொருளில் உட்கவரப்படுதல்.

(உ) பிளவை உண்டாக்கும் நியூட்ரான்களின் உட்கவர்ச்சி

மேற்கண்ட முதல் நான்கு காரணங்களால், பிளவினை உண்டாக்கும் நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கை குறைந்துவிடுவதால், கருப்பிளவைக் கொடுக்கும் நியூட்ரான் உட்கவர்ச்சி

குறைந்துவிடுகிறது. மூன்று நான்காவது காரணங்களால் ஏற்படும் நியூட்ரான்களின் இழப்பை உலையின் செய்பொருள் தன்மை, அதன் அமைப்பு ஆகியவற்றைக் கொண்டு குறைத்து விடலாம். இரண்டாவது காரணத்தினல் ஏற்படும் இழப்பை அணு உலையின் பரிமாணத்தை அதிகப்படுத்துவதன்மூலம் குறைக்கலாம். உலையிலிருந்து தப்பிக்கும் வீதம் உலையின் மேற்பரப்பிற்கு நேர்விகிதத்தில் அமைகிறது. அணு உலை கோண வடிவத்தில் நிறுவப்படுவதாக வைத்துக்கொண்டால், இவ் வீதம் உலையின் ஆரத்தின் இருமடிக்கு நேர்விகிதத்தில் இருக்கிறது (γ^2). நியூட்ரான்களின் வீதம் உலையின் கனபரிமாணத்திற்கு நேர்விகிதத்தில் இருக்கிறது. எனவே, கருப்பிளவு உண்டாகித் தொடர்ந்து இயங்குவதற்கு உலை ஒரு குறிப்பிட்ட அளவு உடையதாக இருக்கவேண்டுமென்பது புலனுகின்றது. இந்த அளவை உலையின் 'மாறுநிலை அளவு' (critical size) எனலாம். உலையின் அளவு மாறுநிலை அளவிற்குக் குறைவாக இருந்தால், பிளவு தொடர்ந்து நிகழாது. அளவு அதிகமாக இருந்தால் உலை வெடித்து நாசமாகிவிடும்.

அணுஉலையில் பயன்படுத்தப்படும் எரிபொருளுக்கும் 'மாறுநிலை நிறை' (critical mass) என்று ஒன்றைக் கற்பிக்கலாம். எரிபொருள் மேற்கூறிய காரணங்களால் ஒரு குறிப்பிட்ட நிறையைக் கொண்டிருக்கும்பொழுதுதான் அதில் கருப்பிளவு தொடர்ந்து நிகழும். ஒரு எரிபொருளின் நிறை இந் நிறைக்குக் குறைவாக இருக்கும்போது பிளவு கொஞ்சம் கொஞ்சமாகக் குறைந்துகொண்டே வந்து இறுதியில் நின்றுவிடுகின்றது. ஆனல், எரிபொருளின் நிறை மாறுநிலை நிறைக்கு அதிகமாக இருக்கும்போது கருப்பிளவு அதிக வேகத்துடன் வளர்ந்து எரிபொருள் அனைத்தும் நொடியில் பிளவுற்று அழிந்துவிட ஏதுவாகின்றது. அணுக்குண்டில் இத் தத்துவம்தான் பயன்படுத்தப்பட்டிருக்கிறது.

பிளவு நிகழாத, மாறுநிலை நிறைக்குக் குறைவான நிறையுள்ள இரு எரிபொருள் துண்டங்கள் வெவ்வேறு வகைகளில் ஒன்ருகப் பிணைக்கப்படும்பொழுது, துண்டங்களின் நிகரநிறையானது மாறுநிலை நிறைக்கு மிக அதிகமாகிவிடுகிறது. எனவே, பிளவுச் செயலீடு உடனே ஏற்பட்டு நொடியில் எரிபொருளெல்லாம் பிளவுற்று அழிகின்றன. இவ் வழியிலிருந்து மிகப் பெரும் அளவிற்கு ஆற்றல் வெளியேறுகிறது. இவ்வாறுதான் அணுக்குண்டுகள் தயாரிக்கப்படுகின்றன.

U^{235} ஐசோடோப்பிற்கும், Pu^{239} ஐசோடோப்பிற்கும் உரிய மாறுநிலைநிறை கணக்கிடப்பட்டிருக்கிறது. ஆனால், இயற்கையில் கிடைக்கும் யுரேனியத்தின் மாறுநிலை நிறையைக் கணிக்கமுடியவில்லை.

வெப்ப நியூட்ரான்களைக் கொண்டு பிளவுச் செயலீட்டை மிக எளிதில் நிகழ்த்த முடியும் என்றாலும், பிளவுத் தொடர் வினையை அதிகத் திசைவேகம் கொண்ட நியூட்ரான்களைக் கொண்டும் நடைபெறச் செய்யலாம். எனவே, அணுஉலைகளை அவ் வுலையில் எந்தத் திசைவேகம் கொண்ட நியூட்ரான்கள் பயன் படுத்தப்படுகின்றன என்பதைப் பொறுத்து மூன்று வகைகளாகப் பிரிக்கலாம்.

(i) வெப்ப நியூட்ரான் அணுஉலைகள்

இவ் வகை அணு உலைகளில் வெப்ப நியூட்ரான்களே பிளவுச் செயலீட்டை நிகழ்த்துவதற்குப் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. இவ் வகை அணுஉலைகள்தாம் நடைமுறையில் பெரும்பாலும் நிறுவப் படுகின்றன. உலையில் நிகழ்கின்ற பிளவுச் செயலீட்டில் கிடைக் கின்ற நியூட்ரான்களின் திசைவேகங்கள் குறைக்கப்பட வேண்டு மாதலால், இவை அதிக பரிமாணம் உடையனவாய் இருக் கின்றன. இவை பெரும்பாலும் மின் உற்பத்தி எந்திரங்களிலும், கப்பல்களிலும், நீர்மூழ்கிக் கப்பல்களிலும் பயன்படுத்தப்படு கின்றன.

(ii) நடுத்தரத் திசைவேகம் கொண்ட நியூட்ரான் அணு உலைகள்

இவ் உலைகளில் நடுத்தரத் திசைவேகம் கொண்ட நியூட்ரான்கள் பிளவுச் செயலீட்டை நிகழ்த்துகின்றன. இவை சிறிய பரி மாணம் கொண்டிருந்தபோதிலும், இவற்றைப் பராமரித்தல் மிகக் கடினமாதலால், இவ் வகை அணுஉலைகள் நடை முறையில் நிறுவப்படுவதில்லை.

(iii) அதிகத் திசைவேகம் கொண்ட நியூட்ரான், அணு உலைகள்

இவ் வகை உலைகள் மிகச் சிறியவை; சோதனைகள் செய்வ தற்கு மட்டுமே சோதனைச் சாலைகளில் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. அணுக்குண்டும் ஒரு விதத்தில் இத்தகைய அணுஉலை என்றே கூறலாம்.

இனி வெப்ப நியூட்ரான் அணு உலைகளைப் பற்றி மட்டுமே காண்போம்.

6·19. வெப்ப நியூட்ரான் அணு உலைகள்

தொடர்வினை ஒன்றால் நியூட்ரான்கள் எவ்வாறு பெருகுகின்றன என்பதை இங்குப் பார்ப்போம். முதல் U^{238}, U^{235} கருக்களைக் கொண்ட ஒரு உலை எரிபொருளை எடுத்துக்கொள்வோம். அது இயற்கையில் கிடைக்கும் கலவையாகவாவது அல்லது அதிக அளவு U^{235} இருக்குமாறு தயாரிக்கப்பட்ட கலவையாகவாவது இருக்கலாம். இந்தக் கலவையில் U^{235} கரு ஒன்றில் வெப்ப நியூட்ரான் ஒன்று பிளவு நிகழ்த்தினால், இந்தப் பிளவில் ν எண்ணிக்கையுள்ள அதிகத் திசைவேகங்கள்கொண்ட நியூட்ரான்கள் கிடைக்கும். இதில் ஒரு சிறு பகுதி U^{235} கருவோடு மோதி அதைப் பிளவுறச் செய்து மேலும் சில நியூட்ரான்களை உண்டாக்கும். எனவே, இப்போது அதிகத் திசைவேகம் கொண்ட ν நியூட்ரான்களுக்குப் பதிலாக $\nu\varepsilon$ அதிகத் திசைவேகம் கொண்ட நியூட்ரான்கள் உண்டாகும். ε ஒன்றிற்கு மேற்பட்ட மதிப்புடையது ($\varepsilon = 103$) இது 'அதிகத் திசை வேகப் பிளவுக் குணகம்' (fast fission factor) என்றழைக்கப்படுகிறது.

இவ்வாறு உற்பத்தி செய்யப்பட்ட அதிகத் திசைவேகமுடைய நியூட்ரான்களில் சில, உலை அமைப்பிலிருந்து தப்பித்து விடுகின்றன. இவ்வாறு தப்பிக்கின்ற நியூட்ரான்களின் பின்னம் l_f என்று கொண்டால், உலையில் எஞ்சியுள்ள அதிகத் திசைவேகம் கொண்ட நியூட்ரான்கள் $\nu\varepsilon\,(1-l_f)$ ஆகும்.

இப்பொழுது இந்த நியூட்ரான்களின் வேகங்கள் மிகக் குறுகிய நேரத்தில் குறைத்து U^{235} கருக்களோடு மோதுமாறு செய்ய வேண்டும். காலம் தாமதித்தால் இந்த நியூட்ரான்களில் சில மற்றுமுள்ள பொருள்களால் ஈர்க்கப்பட்டுவிடும். நியூட்ரான்களின் வேகங்களைக் குறைப்பதற்கு அவற்றைக் கரி (graphite) அல்லது கனநீர் (heavy water) அணுக்களோடு 'மீட்சியுறு மோதல்' ஏற்படச் செய்யவேண்டும். மேற்கூறிய பொருள்கள் 'தணிப்பான்கள்' என அழைக்கப்படுகின்றன. இவ்வாறு நியூட்ரான்களின் வேகங்களைக் குறைக்கின்றபொழுது அவை நடுத்தர ஆற்றல் பெற்ற நியூட்ரான்களாக மாறிவிடுகின்றன. இவற்றில் சில U^{238} கருவில் உட்கவரப்படுகின்றன. அதாவது, இவற்றின் ஆற்றல் U^{238} கருவினால் உட்கவரப்படுமளவிற்கு ஒத்ததிர்வு ஆற்றல் படைத்திருப்பின் இவை U^{238} கருவினால் கவரப்படுகின்றன. இதனால், நியூட்ரான்களின் ஒரு பகுதி இழக்கப்படுகின்றது. 'p' என்பதை இவற்றின் "ஒத்ததிர்வு தப்பித்தல் நிகழ்திறன்" (resonance escape probability) என்று கொண்டால் வெப்ப ஆற்றல் அளவிற்கு வேகங்கள்

குறைக்கப்பட்ட நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கை $\nu\varepsilon(1-l_f)p$ ஆகிறது.

இந்த வெப்ப நியூட்ரான்களிலும் ஒரு சில நியூட்ரான்கள் தப்பித்துவிடுகின்றன. இவ்வாறு தப்பிக்கின்ற நியூட்ரான்களின் பின்னம் l_t என்றால், எஞ்சியுள்ள வெப்ப நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கை $\nu\varepsilon(1-l_f)p(1-l_t)$ என்று ஆகிறது.

இந்த எண்ணிக்கை உள்ள வெப்ப நியூட்ரான்களிலும் ஒரு பகுதியே U^{235} கருவால் உட்கவரப்படுகிறது. இது '*f*' என்ற எழுத்தால் குறிக்கப்படுகிறது. இதை வெப்பப் பயன்பெறு குணகம் (termal utilisation factor) என்று அழைக்கலாம். இவ்வாறு U^{235} கருவினால் ஈர்க்கப்படுகின்ற நியூட்ரான்களில் ஒரு சில துகள்கள் மட்டுமே பிளவை உண்டாக்குகின்றன. வேறு சில, U^{235} கருவை U^{236} கூட்டுக் கருவாக மாற்றப் பயன்படுகின்றன. எனவே, பிளவை உண்டாக்கும் பகுதியை $\sigma f/\sigma a$ என்று கொள்வோம். இங்கு σf என்பது பிளவுச் செயலீட்டின் முகப் பரப்பையும், $\sigma . a$ என்பது நியூட்ரான் உட்கவர்தல் முகப்பரப்பையும் குறிக்கின்றன. எனவே U^{235} கருவில் ஏற்படும் ஒரு பிளவின் இறுதியில் கிடைக்கின்ற பிளவுச் செயலீடுகளின் எண்ணிக்கையை

$$\kappa = \nu\varepsilon(1-l_f)p(1-l_t)f\,\frac{\sigma f}{\sigma a} \qquad \ldots \quad (6{\cdot}32)$$

என்று எழுதலாம். κ என்ற தகைவு 'பெருக்கல் குணகம்' (multiplication factor) என்று அழைக்கப்படுகின்றது. ஒரு U^{235} கருவின் பிளவினால் விளைகின்ற அதிகத் திசை வேகம் கொண்ட பிளவு நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கையை

$$\eta = \nu\,\frac{\sigma f}{\sigma a} \qquad \ldots \quad (6{\cdot}33)$$

என்று எழுதினால், "பெருக்கல் குணகம்," (multiplication factor)

$$\kappa = \eta\,\varepsilon\,p\,f\,(1-l_f)\,(1-l_t) \qquad \ldots \quad (6{\cdot}34)$$

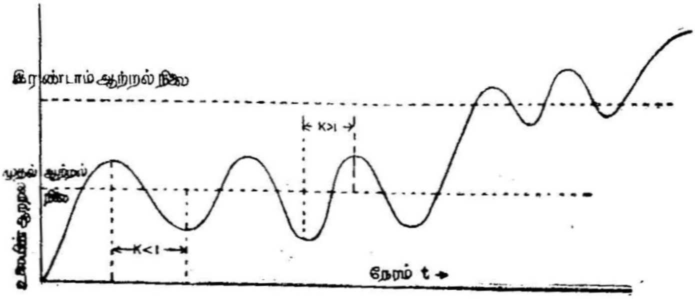
என்றாகிறது.

தொடர்வினை தொடர்ந்து நடைபெற வேண்டுமானால் κ-ன் மதிப்பு குறைந்தது ஒன்றாகவாவது இருக்கவேண்டும். ($\kappa = 1$) κ-ன் மதிப்பு ஒன்றாக இருக்கும்பொழுது அணு உலை மாறுநிலை மட்டத்தில் இருக்கின்றது எனலாம். நடைமுறையில் κ-ன் மதிப்பு ஒன்றாக இருக்குமாறு செய்வது கடினம். κ-ன் மதிப்பு

ஒன்றைவிடச் சிறிது அதிகரித்தாலும், செயலீட்டு வீதம் மடிப்பு வீதத்தில் அதிகமாகிவிடுகிறது. K-ன் மதிப்பு ஒன்றிற்கும் குறைவாக இருக்கும்போது செயலீட்டு வீதம் மடிப்பு வீதத்தில் குறைகிறது. நியூட்ரான்களை உட்கவர்ந்துகொள்ளும் தன்மை வாய்ந்த 'கட்டுப்படுத்தும் தண்டுகளை' (control rods) உலையின் உள்ளே அழுத்தியோ அல்லது வெளியே இழுத்தோ இந்த K-ன் மதிப்பை மாறும்படி செய்யலாம். செயலீட்டு வீதங்கள் மாறுபடுவது படத்தில் காட்டப்பட்டுள்ளது.

பிளவுச் செயலீட்டைக் கட்டுப்படுத்தும் காப்புத் தண்டுகள் உலையில் நிறுவப்பட்டிருக்கின்றன. இத் தண்டுகளின் உதவியால் அணு உலையை வெகு விரைவில் மூடிவிட முடியும்.

பிளவுச் செயலீட்டில் கிடைக்கின்ற எல்லா நியூட்ரான்களையும் உடனடியாக உற்பத்தி செய்யாவண்ணம் அமைக்க முடியுமானல், அணுஉலையைக் கட்டுப்படுத்த முடியும். உற்பத்தி



படம் 6·13
கட்டுப்படுத்தும் தண்டுகளை மாறுபடச் செய்வதனல் ஏற்படும் அணுஉலை ஆற்றல் கால அளவில் மாறுதல்

யாகும் நியூட்ரான்களில் $\frac{3}{4}$ பங்கு அல்லது ஏறத்தாழ ஒரு விழுக்காடு அளவுக்குத் தாமதித்துவரும் நியூட்ரான்களாக இருந்தால் உலையை வெகு எளிதில் கட்டுப்படுத்திவிடலாம். U^{235} கரு எரிபொருளாகப் பயன்படுத்தப்படும் உலைகளில் $\kappa > 1{\cdot}0075$ ஆக இருந்தால் அவை 'மாறுநிலை' அடைகின்றன. U^{289} எரிபொருள் கொண்ட உலையில் K-ன் மதிப்பு இதற்கும் குறைவாக உள்ளது.

கோட்பாடுகளுக்கு ஏற்ப ஓர் அணுஉலை ஈறிலி பரிமாணம் கொண்டிருப்பதாகக் கொண்டால் $l_t = l_f = 0$ ஆகும். எனவே பெருக்கல் குணகம்

$$K\alpha = \eta\, t\, p\, f \quad \dots \quad (6{\cdot}35)$$

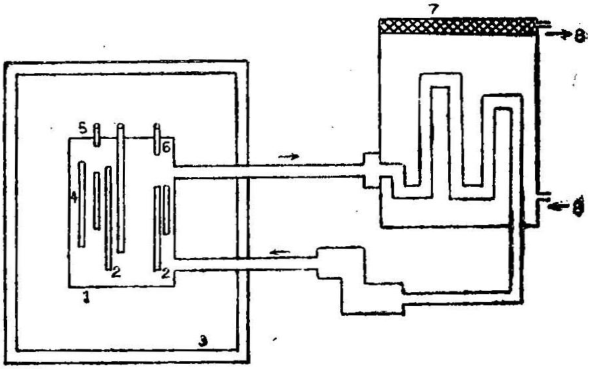
என ஆகும். சமன்பாடு 6·35 'நான்கு குணக வாய்பாடு' (four factor formula) என்று அழைக்கப்படுகிறது.

அணுஉலைகளின் அமைப்பு, 'நிகழ் ஒத்ததிர்வு தப்பித்தல் நிகழ்திறன்' *p*-யையும் 'வெப்பப் பயன்பெறு குணகத்தை'யுமே பொறுத்திருக்கிறது. அணுஉலையில் எரிபொருள், தணிப்பான் ஆகியவற்றின் வகைப்படுத்துதல் *p*-யின் மதிப்பையும், உட்கவரும் பொருளின் அளவு அது உலையில் பரவியுள்ள விதம் ஆகியவை *f*-ன் மதிப்பையும் நிர்ணயிக்கின்றன.

அணுஉலைகளில், பிளவுச் செயலீட்டிலிருந்து கிடைக்கும் ஆற்றலை அப்புறப்படுத்துவதற்குக் 'குளிர்விகள்' (coolants) பயன்படுத்தப்படுகின்றன. அணுஉலை செய்யப்பட்ட பொருள் நியூட்ரான்களை உட்கவரும் பொருளாக இருத்தல் கூடாது.

6·20. தணிப்பான்கள்

அணுஉலைகளில் 'தணிப்பான்கள்' மிகமிக அவசியமாதலால் அவற்றின் ஒருசில பண்புகளைத் தெரிந்துகொள்ள வேண்டியது அவசியம். அதிகத் திசை வேகமுடைய நியூட்ரான்கள் இத் தணிப்பான் அணுக்களின்மீது 'மீட்சியுறு மோதல்' நிகழ்த்து



படம் 6·14

ஓர் அணுஉலை

1. அழுத்தக் கலன்
2. எரிபொருள் தண்டுகள்
3. உறை
4. தணிப்பான்
5. கட்டுப்படுத்தும் தண்டுகள்
6. குளிர்வி
7. வெப்பமாற்றி
8. நீராவி டர்பைனுக்கு
9. தண்ணீர்

கின்றபொழுது அவற்றின் வேகங்கள் குறைக்கப்படுகின்றன. தணிப்பான்கள் கூடுமானவரை நியூட்ரான்களை ஈர்க்கமுடியாதவையாக இருத்தல் அவசியம். இலேசான பொருள்களான தண்ணீர், பாரபின், கிராபைட் போன்றவை அதிக விலையற்ற தணிப்பான்களாகப் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. கனநீர், பெரிலியம் போன்றவை விலை உயர்ந்தவை. ஆனால், அதிக அளவு தணிப்புத்திறன் பெற்றவை. படம் 6·14-ல் ஓர் எளிய உலையின் படத்தைக் காணலாம்.

6·21. புற யுரேனியத் தனிமங்கள் (trans uranic elements)

முன்னுரை

செயற்கை மூலக மாற்றங்களால் (artifcial transmutation of elements) யுரேனியம் போன்ற தனிமங்களிலிருந்து அதைவிட அதிக நிறைவாய்ந்த பல தனிமங்கள் கண்டுபிடிக்கப்பட்டுள்ளன. யுரேனியம் போன்ற தனிமத்தின் கருக்களை அணு உலையி னின்றும் கிடைக்கும் அதிகத் திசைவேக நியூட்ரான்களைக் கொண்டு தாக்கியபொழுது, புளூடோனியம், நெப்டியூனியம் போன்ற தனிமங்கள் கிடைத்தன. இப்பொழுது செயற்கைத் தனிம மாற்ற முறைகளினால் அணுஎண் $Z = 105$ வரை உள்ள தனிமங்கள் சோதனைச் சாலைகளில் உற்பத்தி செய்யப்படுகின்றன. இவற்றில் பெரும்பாலானவை மிகக் குறுகிய அரை வாழ்வுக் காலம் கொண்டவை. ஆதலால், இவை நீண்ட காலத்திற்கு உறுதிநிலையில் இருக்கமுடியாது. இத் தனிமங்கள் முதன் முதலில் எவ்வாறு பெறப்பட்டன என்பதைப் பார்ப்போம்.

(அ) புளூடோனியம் ($Z = 94$), நெப்டியூனியம் ($Z = 93$) ஆகிய தனிமங்களின் கண்டுபிடிப்பு

யுரேனியத்தை அடுத்து முதலாவதாகக் கண்டுபிடிக்கப்பட்ட தனிமம் அணுஎண் 93 கொண்ட தனிமமாகும். இதனை மாக்மில்லன், ஏபில்ஸன் என்ற இரு அமெரிக்க விஞ்ஞானிகள் கண்டுபிடித்தனர். இது கோள் ஒன்றின் பெயரை ஒட்டி நெப்டியூனியம் என்று அழைக்கப்பட்டது. யுரேனியத்தை, நியூட்ரான்களைக் கொண்டு தாக்கிப் பிளவுறச் செய்தபோது, 23 நிமிடம் 2·3 நாள்கள் அரைவாழ்வுக் காலங்கள் கொண்ட, கதிரியக்கமுடைய இரு தனிமங்கள் கிடைத்தன. பெர்க்லி சைக்ளோட்ரானிலிருந்து கிடைத்த டியூட்ரான்களைக் கொண்டு, பெரிலியம் தனிமத்தைத் தாக்கி, அதனின்று கிடைத்த நியூட்ரான்களை யுரேனியக் கருவோடு மோதவிட்டபொழுது பின்வரும் செயலீடுகள் நடைபெற்றன.

$$_{92}U^{238} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{92}U^{239} + \gamma \qquad \ldots \quad (6{\cdot}36)$$

$$_{92}U^{239} \xrightarrow{23{\cdot}5 \text{ நிமிடங்கள்}} {}_{93}Np^{239} + {}_{-1}e^0 + \gamma \qquad \ldots \quad (6{\cdot}37)$$

$$_{93}Np^{239} \xrightarrow{2{\cdot}33 \text{ நாள்கள்}} {}_{94}Pu^{239} + {}_{-1}e^0 + \gamma \qquad \ldots \quad (6{\cdot}38)$$

$$_{94}Pu^{239} \xrightarrow{24{,}400 \text{ ஆண்டுகள்}} {}_{92}U^{235} + {}_2He^4 \qquad \ldots \quad (6{\cdot}39)$$

$_{92}U^{238}$ கரு அதிகத் திசைவேகமுள்ள நியூட்ரான்களைத் தன்னிடம் உட்கவர்ந்துகொண்டு உறுதிநிலையற்ற U^{239} கருவாக மாறுகிறது. இச் செயலீட்டில் γ கதிர் வெளியிடப்படுகிறது. இக் கரு (U^{239}) ஓர் எலக்ட்ரானை உமிழ்ந்து (அரைவாழ்வுக் காலம் = 23·5 நிமிடம்) முதல் புற யுரேனியத் தனிமமான நெப்டியூனியமாக மாறுகிறது. இதுவும் கதிரியக்கத்தினால் எலக்ட்ரான் ஒன்றை உமிழ்ந்து இரண்டாவது புற யுரேனியத் தனிமமான புளூடோனியமாக மாறுகிறது. [இத் தனிமம், பூமியைச் சுற்றி வரும் கோள்களில் ஒன்றான புளூடோவை ஒட்டிப் பெயர் பெற்றிருக்கிறது], இக் கருவும் α துகள் ஒன்றை உமிழ்ந்து (அரைவாழ்வுக் காலம் = 24,400 ஆண்டுகள்) U^{235} கருவாக மாறுகிறது. புளூட்டோனியம் நீண்ட அரைவாழ்வுக் காலம் கொண்டிருப்பதால், இது உறுதிநிலையில் இருக்கிறதெனக் கூறலாம். U^{235}கரு வெப்ப நியூட்ரான்களை உட்கவர்ந்து பிளவுறுவது போல், Pu^{239} கருவும் வெப்ப நியூட்ரான்களை உட்கவர்ந்து பிளவுறுகிறது. இதனால், இத் தனிமம் அணுஉலைகளில் பெருமளவிற்குப் பயன்படுத்தப்பட்டுவருகிறது.

நெப்டியூனியத்திற்கு, Np^{239} அணுவைத் தவிர வேறு இரு ஐசோடோப்புகளும் உள்ளன. இவை Np^{237}, Np^{238} ஆகும். நெப்டியூனியம் வெள்ளியைப்போல் பளபளப்பானது; அதிக விரைவில் ஆக்ஸைடாக மாறுவதில்லை. இதன் ஒப்படர்த்தி 1·77. Np^{237} ஐசோடோப்பு, 2·2 மில்லியன் ஆண்டு அரைவாழ்வுக் காலம் கொண்டிருப்பதாலும், அதனின்று உமிழப்படும் α கதிரியக்கம் அபாயமற்றதாக இருப்பதாலும் இது சோதனைச் சாலைகளில் அதிக அளவிற்குப் பயன்படுத்தப்படுகின்றது. புளூடோனியமும் நெப்டியூனியம் போலவே வேதியற் பண்புகளைப் பெற்றிருக்கிறது. ஆனால், அது அதிக அளவு α கதிரியக்கத்தைப் பெற்றிருப்பதால், அதன் பண்புகளைத் தெரிந்துகொள்வதற்குத் தனிப்பட்ட ஆய் கருவிகள் தேவைப்படுகின்றன.

(ஆ) அமெரிசியம் (Z = 95), கியூரியம் (Z = 96) தனிமங்கள்

சீபோர்க் (Sea Borg), ஜேம்ஸ், மார்கன் என்ற அமெரிக்க விஞ்ஞானிகளால் 1944ஆம் ஆண்டு, சிகாகோ பல்கலைக் கழகத்திலிருக்கும் உலோகவியல் (metallargical lab) சோதனைச் சாலையில் அணுஎண் 95 உள்ள அமெரிசியம் கண்டுபிடிக்கப் பட்டது. அணுஉலையிலிருந்து வெளிவந்த நியூட்ரான்களைக் கொண்டு Pu^{238} கருவைத் தாக்கியபொழுது பல செயலீடுகளுக்குப் பின்னல் கதிரியக்கமுடைய தனிமம் கிடைத்தது.

$$_{94}Pu^{239} + {_0n^1} \longrightarrow {_{94}Pu^{240}} + \gamma \quad \dots \quad (6{\cdot}40)$$

$$_{94}Pu^{240} + {_0n^1} \longrightarrow {_{94}Pu^{241}} + \gamma \quad \dots \quad (6{\cdot}41)$$

$$_{94}Pu^{241} \xrightarrow{\text{14 வருடங்கள்}} {_{95}Am^{241}} + {_{-1}e^0} \quad \dots \quad (6{\cdot}42)$$

இத் தனிமம் முதன் முதலாக அமெரிக்காவில் கண்டுபிடிக்கப் பட்டதால் அமெரிசியம் என்று அழைக்கப்பட்டது. அமெரிசியத்தின் (Americium) அரைவாழ்வுக் காலம் 475 ஆண்டுகள்.

$$_{95}Am^{241} \xrightarrow{\text{475 ஆண்டுகள்}} {_{93}Np^{237}} + {_2He^4} \quad \dots \quad (6{\cdot}43)$$

இச் சமன்பாட்டின்படி அமெரிசியம் α கதிரியக்கம் உடைய தனிமமாகும். அமெரிசியத்துக்கு 25 நிமிடங்கள் முதல் 10^4 ஆண்டுகள்வரை அரைவாழ்வுக் காலம் கொண்ட 8 ஐசோடோப்புகள் உள்ளன என்று கண்டுபிடிக்கப்பட்டுள்ளது.

இதை அடுத்த புற யுரேனியத் தனிமம் அணுஎண் 96 கொண்டதாகும். இதுவும் அமெரிக்காவில் சீபோர்க் குழுவினரால் கண்டுபிடிக்கப்பட்டுள்ளது. பெர்க்லி சைக்ளோட்ரானிலிருந்து கிடைத்த 32 மி. எ. வோ. ஆற்றல் கொண்ட α துகள்களைக் கொண்டு அணு உலையிலிருந்து கிடைத்த புளுடோனியத்தைத் தாக்கியபொழுது இத் தனிமம் கிடைத்தது.

$$_{94}Pu^{239} + {_2He^4} \longrightarrow 96\ Cm^{242} + {_0n^1} \quad \dots \quad (6{\cdot}44)$$

$$_{96}Cm^{242} \xrightarrow{\text{160 நாள்கள்}} {_{94}Pu^{238}} + {_2He^4} \quad \dots \quad (6{\cdot}45)$$

மேற்கண்ட செயலீட்டில் அணுஎண் Z = 96 கொண்ட கதிரியக்கமுடைய ஒரு தனிமம் கிடைத்தது. இது ரேடியத்தைக் கண்டுபிடித்த மேரி கியூரியின் பெயரை ஒட்டி கியூரியம் (Curium) என்று அழைக்கப்பட்டது. கியூரியம் ^{242} மிக அதிக அளவில்

கதிரியக்கத்தைக் கொண்டிருக்கிறது. ஒரு மில்லி கிராம் Cm^{242} ஒரு நிமிடத்திற்கு 10^{13} சிதைவுகள் கொடுக்கிறது. [இது ரேடியத்தின் கதிரியக்கத்தைப் போல 3000 மடங்காகும்.] இதன் செயலூக்கம் (activity) மிக அதிகம். எடுத்துக்காட்டாக ஒரு மைக்ரோகிராம் நிறையுள்ள கியூரியம் தன்னைத்தானே புகைப் படம் எடுத்துக்கொள்வதற்கு வேண்டிய ஒளியை வெளிவிடுகிறது. இதுவரை கியூரியத்திற்கு 8 ஐசோடோப்புகள் கண்டுபிடிக்கப் பட்டுள்ளன. இவை 25 மணியிலிருந்து 100 வருடங்கள் வரையுள்ள அரைவாழ்வுக் காலம் கொண்ட α கதிர் உமிழிகள். அமெரிசியம், கியூரியம் போன்ற தனிமங்கள் வேதியல் மாறுதல்களில் யுரேனியத்தைப் போன்றவையே. இவை இரண்டும் 5*f* ஆக்டினைடு (5*f* Actinide) தொடர் தனிமங்களாகும்.

(இ) பெர்கலியம் (Z = 97) கலிபோர்னியம் (Z = 98)

அணு எண் 97 கொண்ட புற யுரேனியத் தனிமத்தை 1949ஆம் ஆண்டு தாம்சன், சீபோர்க் கிரோசோ ஆகியோர் பெர்க்லியில் கண்டுபிடித்தனர். இது அமெரிக்காவில் கலிபோர்னியாவிலுள்ள பெர்க்லி என்ற இடத்தில் கண்டுபிடிக்கப்பட்டதால் பெர்க்லியம் (Berkelium) என்று அழைக்கப்பட்டது. அமெரிசியத்தை 35 மி. எ. வோ. ஆற்றல் கொண்ட ஹீலியம் அயனி கொண்டு தாங்கியபொழுது பெர்கலியம் கிடைத்தது.

$$_{95}Am^{241} + {_2}He^4 \longrightarrow {_{97}}Bk^{243} + 2\,{_0}n^1 \quad \ldots \quad (6{\cdot}46)$$

$$_{97}Bk^{243} \xrightarrow{4{\cdot}6 \text{ மணிகள்}} {_{96}}Cu^{243} \quad \ldots \quad (6{\cdot}47)$$

(எலக்ட்ரான் ஈர்ப்பு) அல்லது

$$_{97}Be^{243} \xrightarrow{4{\cdot}6 \text{ மணிகள்}} {_{95}}Am^{239} + {_2}He^4 \quad \ldots \quad (6{\cdot}48)$$

பெர்கலியத்திற்கு நான்கு ஐசோடோப்புகள் உள்ளன. Be^{245}, 4·05 நாள்கள் அரைவாழ்வுக் காலம் கொண்ட ஒரு α துகள் உமிழி. 4·6 மணி அரைவாழ்வுக் காலம் கொண்ட *k* எலக்ட்ரான் ஈர்ப்புடைய Be^{244}-ம் பெர்கலியத்தின் மற்றோர் ஐசோடோப்பாகும். இவற்றைத் தவிர்த்து B^{249}, B^{250} என்ற இரு ஐசோடோப்புகளும் பெர்கலியத்திற்கு உண்டெனக் கண்டு பிடிக்கப்பட்டுள்ளது.

பெர்கலியத்திற்கு அடுத்த புற யுரேனியத் தனிமம் கலிபோர்னியம் ஆகும். (Z = 98) இதை 1950ஆம் ஆண்டு தாம்சன், சீபோர்க் கிராசோ ஸ்ட்ரீட் (Street) என்ற விஞ்ஞானிகள் கண்டு

பிடித்தனர். கியூரியம் தனிமத்தை 35 மி.எ.வோ. ஆற்றல் உள்ள அயனிகளால் தாக்கியபொழுது இத் தனிமம் பெறப்பட்டது.

$$_{96}Cm^{242}+_{2}He^{4} \longrightarrow _{98}C_{f}^{244}+2_{0}n^{1} \quad \ldots \quad (6{\cdot}49)$$

$$_{98}Cf^{244} \xrightarrow{\text{45 நிமிடங்கள்}} _{96}Cm^{240}+_{2}He^{4} \quad \ldots \quad (6{\cdot}50)$$

முதன்முதலில் சோதனைகள் நிகழ்த்தப்பட்டபொழுது ஒரு கிராமில் மில்லியன்களில் ஒரு மடங்கே கியூரியம் கிடைத்தது. எனவே, அதனின்றும் மேற்கண்ட சமன்பாட்டின்படி பெறப்பட்ட கலிபோர்னியம் அளவில் 5000 அணுக்களுக்குக் குறைவாகவே இருந்தது. கலிபோர்னியத்திற்கு C^{246} என்ற ஐசோடோப்பும் உள்ளது. இது 36 மணி நேரம் அரைவாழ்வுக் காலம் கொண்ட. ஒரு α துகள் உமிழி. இவற்றைத் தவிர இரண்டு ஐசோடோப்புகள் கலிபோர்னியத்திற்கு உள்ளன என்பது சோதனைகளிலிருந்து அறியப்படுகின்றது.

(ஈ) ஐன்ஸ்டீனியம் ($_{99}Es$) ஃபெர்மியம் ($_{100}Fm$)

இத் தனிமங்கள் முதன் முதலில் 1953ஆம் ஆண்டு பசிபிக் மகாசமுத்திரத்தில் நிகழ்த்தப்பட்ட 'மைக்' வெப்பக்கரு வெடிப்பினால் (thermo-nuclear explosions) ஏற்பட்ட விளைபொருள்களிலிருந்து பிரித்தெடுக்கப்பட்டன. இவை முறையே ஐன்ஸ்டீன், ஃபெர்மி என்ற இயற்பியல் அறிஞர்களின் பெயர்களைக்கொண்டு அழைக்கப்படுகின்றன. $_{92}U^{238}$ தனிமத்தைக் கன அயனிகளைக் கொண்டு தாக்கியபொழுது $_{99}Es$ தனிமம் கிடைத்தது.

$$_{92}U^{238}(_{7}N^{14},\ 5n)_{99}Es^{247} \quad \ldots \quad (6{\cdot}51)$$

$$_{92}U^{238}+N^{14} \longrightarrow _{99}Es^{247}+5_{0}n^{1} \quad \ldots \quad (6{\cdot}52)$$

இதன் அணுநிறை எண் 246-லிருந்து 257 வரை உள்ளது. இதில் அதிக அரைவாழ்வுக் காலம் (500 நாள்கள்) கொண்ட ஐசோடோப்பு Es^{254} ஆகும்.

இதைப் போன்றே ஃபெர்மியமும் கீழ்க்கண்ட செயலீடுகளினின்றும் கிடைக்கிறது.

$$_{92}U^{238}\ (_{8}O^{16},\ 4n)\ _{100}Fm^{250} \quad \ldots \quad (6{\cdot}53)$$

மற்றும்

$$_{94}Pu^{240}\ (_{6}C^{12},\ 4n)\ _{100}Fm^{248} \quad \ldots \quad (6{\cdot}54)$$

ஃபெர்மியம் ஐசோடோப்புகள் அ.நி.எ. 248-லிருந்து 257 வரை உடையவை.

(உ) மான்டலீயம் ($_{100}Md$), நோபிலியம் ($_{102}Nb$)

இவ் விரு தனிமங்களும் மேற்கண்ட தனிமங்களைப் போலவே விஞ்ஞானிகளின் பெயரால் அழைக்கப்படுகின்றன. மான்டலீயம் முதலில் 1955ஆம் ஆண்டு கண்டுபிடிக்கப்பட்டது. சைக்ளோட்ரானிலிருந்து கிடைக்கும் α துகள்களைக் கொண்டு $_{99}Es^{253}$ தனிமத்தைத் தாக்கியபொழுது இது பெறப்பட்டது. இச் செயலீட்டில் பயன்படுத்தப்பட்ட ஐன்ஸ்டீனியம் மிகக் குறைந்த அளவில் இருந்தமையால், மான்டலீயத்தின் அளவும் மிகக் குறைவாக இருந்தது. இது கதிரியக்க வேதியல் முறைகளின்மூலம் $_{101}Md^{255}$ ஆக இருக்கவேண்டுமென்று அறிவிக்கப்பட்டது. இது வட்டப்பாதை எலக்ட்ரான் உட்கவர்ச்சியின்மூலம் $_{100}Fm^{255}$ஆக மாறுகிறது. இதன் அரைவாழ்வுக் காலம் 30 நிமிடங்கள். மான்டலீயம் தனிமத்திற்கு 256 அ.நி.எண் கொண்ட மற்ரோர் ஐசோடோப்பும் உள்ளது. இதன் அரைவாழ்வுக் காலம் 90 நிமிடங்கள். இவற்றைத் தவிர அ. நி. எண் 250 முதல் 254 வரை உள்ள Md ஐசோடோப்புகளும் உள்ளன.

அணுஎண் 102 உள்ள தனிமம் 'நோபிலியம்' என்று அழைக்படுகிறது. இது 1957ஆம் ஆண்டே எதிர்பார்க்கப்பட்டது. இங்கிலாந்து அமெரிக்க நாடுகளிலிருந்து வந்து ஸ்வீடனிலுள்ள சைக்ளோட்ரானில் வேலை செய்த விஞ்ஞானிகள் இதனைக் கண்டுபிடிக்க முயற்சி செய்தனர். $_{96}Cm^{244}$ கரு, $_{6}e^{13}$ அயனிகளால் தாக்கப்பட்டபொழுது அணுஎண் 102 கொண்ட அணுநிறை எண் 251 அல்லது 253 கொண்ட இரண்டில் ஏதாவது ஒரு தனிமம் கிடைக்கலாம் என்று எதிர்பார்க்கப்பட்டது.

$$_{96}Cm^{244}\ (_{6}e^{13},\ 4n) \quad \text{அல்லது}$$
$$_{96}Cm^{244}\ (_{6}e^{13},\ 6n).$$

ஆனல் நோபிலியம் இறுதியாகக் கலிபோர்னியாவில்தான் கண்டுபிடிக்கப்பட்டது. $_{96}Cm^{244}$ கருவை $_{6}e^{13}$ அயனிகட்குப் பதிலாக $_{6}C^{12}$ அயனிகளைக் கொண்டு தாக்கியபொழுது கீழ்க்கண்ட செயலீடு நிகழ்ந்தது.

$$_{96}Cm^{245}\ (_{6}C^{12},\ 4n)$$

இதைத் தொடர்ந்து

$$_{102}\alpha^{254} \rightarrow {}_{100}Fm^{250} + {}_{2}He^{4}\ (\alpha)\ \text{செயலீடும்} \quad \ldots \quad (6{\cdot}55)$$

$$_{100}Fm^{250} \rightarrow {}_{98}C_f^{246} + {}_{2}He^{4}\ (\alpha)\ \text{செயலீடும்} \quad \ldots \quad (6{\cdot}56)$$

நிகழ்ந்தன.

அ. நி. எண் 253, 254, 255 உள்ள நோபிலியத்தின் ஐசோடோப்புகள் இப்போது கண்டுபிடிக்கப்பட்டுள்ளன.

(ஊ) லாரென்சியம் (Z = 103)

1961ஆம் ஆண்டு கலிபோர்னியாவிலுள்ள லாரென்சு கதிரியக்கச் சோதனைச் சாலையில் லாரென்சியம் முதலில் கண்டு பிடிக்கப்பட்டது. இது சைக்ளோட்ரானை நிறுவிய E. O. லாரென்ஸ் என்ற விஞ்ஞானியின் பெயரால் அழைக்கப்பட்டது. அ. நி. எண் 257 கொண்ட லாரென்சியம் ஐசோடோப்பு ஒன்றின் அரைவாழ்வுக் காலம் 80 செகண்டு என்று முடிவுசெய்யப்பட்டிருக்கிறது. இது கதிரியக்கத்தினால் 8·6 மி. எ. வோ. ஆற்றல் பெற்ற α துகளை உமிழ்கிறது. கலிபோர்னியம் கருவை (அ.நி.எண் 249, 250, 251, 252 கொண்ட ஐசோடோப்புகளின் கலவை) போரான் கருக்களைக் கொண்டு தாக்கியபொழுது இத் தனிமம் பெறப்பட்டது. உருஷ்யாவில் $_{103}Lw^{256}$ ஐசோடோப்பை உண்டாக்க அமெரிசியத்தை ஆக்ஸிஜன் கொண்டு தாக்கினர்.

$$_{95}Am^{243}\ (_{8}O^{18}, 5n)\ _{103}Lw^{251}.$$

இதன் அரைவாழ்வுக் காலம் 45 விநாடிகளாகும்.

(எ) அ. நி. எண்கள் 104, 105 கொண்ட புற யுரேனியத் தனிமங்கள்.

உருஷ்யாவில், சில காலத்திற்கு முன்பு அ. நி. எண் 104 கொண்ட புற யுரேனியத் தனிமம் ஒன்றை உருவாக்கினர். இதனை 'குர்செடோவியம்' (Kurchetovium) என்று அவர்கள் அழைக்கின்றனர். இது குர்செடோவ் என்ற ரஷ்ய அணுக்கரு இயற்பியல் வல்லுநர் பெயரைக்கொண்டு அழைக்கப்படுகின்றது. புளுடோனியம் ^{242} கருவை Ne^{22} கருக் கொண்டு தாக்கியபொழுது இத் தனிமம் உருவாகியது என நினைக்கின்றனர். இத் தனிமத்தின் அரைவாழ்வுக் காலம் 0·3 விநாடிகளே. எனவே, இத் தனிமத்தைக் கண்டறிய அனேக முன்னெச்சரிக்கைகள் எடுத்தார்கள் எனத் தெரிகிறது. இதைப்போலவே அ. நி. எண் 105 கொண்ட புற யுரேனியத் தனிமமும் உருஷ்யாவில் உருவாக்கப்பட்டுவிட்டது என சொல்லப்படுகிறது. இது $_{95}Am^{243}$ கருவை $_{10}Ne^{22}$ அயனிகளைக் கொண்டு தாக்கிப் பெறப்பட்டது என்றும், இதன் அரைவாழ்வுக் காலம் 0·1 விநாடியே என்றும் தெரியவருகிறது. எல்லாப் புற யுரேனியத் தனிமங்களும் அவற்றின் அரைவாழ்வுக் காலங்களும் அட்டவணை 6·5-ல் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன.

அட்டவணை 6·5.

புற யுரேனியத் தனிமங்கள்

	தனிமம்	அணு எண்	அரைவாழ்வுக் காலம்
1.	நெப்டியூனியம்—Np	93	2·33 நாள்கள்
2.	புளுடோனியம்—Pu	94	24,400·00 வருடங்கள்
3.	அமெரிசியம்—Am	95	475 ஆண்டுகள்
4.	கியூரியம்—Cu	96	160 நாள்கள்
5.	பெர்கலீயம்—Bk	97	4·6 மணி
6.	கலிஃபோர்னியம்—Cf	98	45 நிமிடங்கள்
7.	ஐன்ஸ்டீனியம்—Es	99	500 நாள்கள்
8.	ஃபெர்மியம்—Fm	100	—
9.	மான்டலீயம்—Md	101	30 நிமிடங்கள்
10.	நோபிலீயம்—Nb	102	—
11.	லாரென்ட்ஸியம்—Lw	103	45 விநாடி
12.	குர்செடோவியம்—Kh	104	0·3 விநாடி
13.	இன்றும் பெயரிடப்படாதது	105	0·1 விநாடி

வினுக்கள்

1. நியூட்ரான் கண்டுபிடிப்பை விவரித்து அதன் பண்புகளை விளக்குக.

2. நியூட்ரானின் விளிம்பு விளைவுச் சோதனைகளை விவரித்து அவற்றின் முக்கியத்துவத்தை விளக்கு.

3. நியூட்ரான் செயலீடுகளைப் பற்றி ஒரு கட்டுரை வரைக.

4. அணுக்கருப் பிளவு என்றால் என்ன? அதை விளக்கப் போர், வீலர் கொடுத்த கோட்பாட்டை விளக்குக.

5. ஒரு கிராம் நிறை கொண்ட U^{235} கரு பிளவுறுவதால் கிடைக்கும் ஆற்றலைக் கிலோவாட் மணிகளில் கணக்கிடுக.

6. அணுக்கருப் பிளவு, அணுக்கருப் பிணைவு ஆகியவற்றைப் பற்றி ஒரு கட்டுரை வரைக.

7. 'கட்டுப்படுத்தப்பட்ட தொடர்ச்செயலீடு' என்றால் என்ன? அது நடைமுறையில் எவ்வாறு செயல்படுகிறது?

8. அணு உலை ஒன்றின் படம் வரைந்து அதன் வெவ்வேறு பாகங்கள் செய்யும் வேலைகளை விவரி.

9. யுரேனியம் கரு ஒன்றில் நிகழும் ஒரு பிளவில் வெளிப்படுத்தப்படும் ஆற்றலை ஏறத்தாழ 200 மி. எ. வோ. என்று கொண்டு, ஒரு வாட் திறன் கிடைக்க ஒரு வினாடியில் எத்தனை பிளவுகள் நிகழவேண்டுமென்று கணக்கிடுக.

10. புற யுரேனியத் தனிமங்கள் யாவை? அவை எவ்வாறு சோதனைச் சாலைகளில் தோற்றுவிக்கப்பட்டன?

7. துகள் முடுக்கிகள்

7·1. முன்னுரை

இயற்கைக் கதிரியக்கத்தில் எவ்வாறு வெவ்வேறு துகள்கள் உமிழப்படுகின்றன என்று நாம் முன்புப் பார்த்தோம். இனி செயற்கை முறையில் எவ்வாறு கருக்களில் கதிரியக்கத்தை உண்டாக்குவது; எவ்வாறு மின்னூட்டம் உள்ள துகள்களில் கருக்களை மோதச் செய்யலாம் என்பனவற்றைக் காண்போம். கரு நேர் மின்னூட்டம் உடையது. எனவே, நேர் மின்னூட்டம் கொண்ட துகள்களைக்கொண்டு கருக்களை நேரிடையாக மோதச் செய்வது இயலாது. மோதப்படும், மோதும் கருக்களிடையே செயல் படும் கூலும் விலக்கு விசையின் காரணமாக நிலவும் நிலையாற்றலைத்தான் நாம் முன்பு மின்னழுத்த அரண் என்று வரையறுத்தோம், எனவே, கருக்களிடையே மோதல் நிகழ வேண்டுமானல் மோதுகின்ற துகளின் ஆற்றல் 'மின்னழுத்த அரணைக் காட்டிலும் ஒரு சிறிய அளவாவது அதிகமாக இருக்க வேண்டும். அதாவது நடைமுறையில் கரு மோதல்களை நிகழ்த்த மோதுகின்ற துகள்களின் ஆற்றல் பல மில்லியன் எலக்ட்ரான் வோல்ட்டுகளாக இருக்கவேண்டும். இந்த அளவு ஆற்றலுள்ள துகள்கள் பூமியின்மீது இயற்கையில் கிடைப்பதில்லை. ஆனல், சில விண்மீன்களின் உட்புறத்தில் இவ்வளவு ஆற்றல் படைத்த துகள்கள் இருக்கலாம் என்று ஊகிக்கப்பட்டிருக்கிறது.

இயற்கைக் கதிரியக்கத்தில் உமிழப்படுகின்ற α துகள்களைக் கொண்டு, முதன் முதலாக 1919ஆம் ஆண்டில் ருதர்போர்டு இத்தகைய கருமோதல்களை நிகழ்த்தினர் என்று முன்பே பார்த்தோம். இதைத் தொடர்ந்து காக்ராப்ட்-வால்டன் சோதனையைப் பற்றியும் படித்தோம். எனவே, கரு மோதல்களை நிகழ்த்துவதற்கு மோதுகின்ற துகள்களின் ஆற்றல்கள் அதிகமாக்கப்பட வேண்டும் என்று அறிகிறோம். அதாவது, மோதும் துகள்கள் முடுக்கம் பெறவேண்டும். மின்னூட்டமுடைய துகள்களை முடுக்கம் பெறச் செய்வதற்குப் பல எந்திரங்கள் இப்போது நடைமுறையில் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. அவற்றுள் சிலவற்றை இங்குக் காண்போம்,

7·2. துகள் முடுக்கிகளின் வகைகள்

துகள் முடுக்கிகளை, அவை துகள்களை நேர்க்கோட்டில் முடுக்குகின்றனவா அல்லது வட்டப்பாதைகளை வளைத்து முடுக்குகின்றனவா என்பதைப் பொறுத்து இரண்டு வகைகளாகப் பிரிக்கலாம். நேர்க்கோட்டில் முடுக்குகின்ற எந்திரங்களை 'நேர்க்கோட்டு முடுக்கிகள்' (linear acceleators) என்றழைக்கப் படுகின்றன. இவ் வகை முடுக்கிகளில் துகள்களுக்குத் தொடர்ந்து முடுக்கம் அளிப்பவை மின் புலங்களாகும். அடுக்கடுக்காகக் கொடுக்கப்படும் முடுக்கங்களெல்லாம் நேர்மின் புலங்களால் இந்த எந்திரங்களில் கொடுக்கப்படுகின்றன. இதற்கு எடுத்துக் காட்டு காக்ராப்ட்-வால்டன் முடுக்கிகளாகும் ஆனல், இவற்றைக் கொண்டு ஒரு சில மில்லியன் எலக்ட்ரான் வோல்ட்டு ஆற்றலுக் குரியதையே பெறமுடியும். ஏனெனில், முடுக்குகின்ற வெவ்வேறு குழாய்களுக்கிடையே நிலவும் அதிக மின்னழுத்தங்களில் மின் கடத்துத் திறன் குறைகிறது. இவற்றைத் தவிர, வான்டிகிராப் நிலைமின்னியற்றிகளும் இதே தத்துவத்தைக் கொண்டு செயல்படுகின்றன. நேர்க்கோட்டு முடுக்கிகளில் எதிர்மின் புலங்களும் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. எடுத்துக்காட்டாகப் புரோட்டான் நேர்க்கோட்டு முடுக்கி, எலக்ட்ரான் நேர்க்கோட்டு முடுக்கி ஆகியவற்றைக் கூறலாம். இத்தகைய எந்திரங்களில் மிக அதிக மின்னழுத்தம் செயல்படக்கூடுமாதலால் இவற்றைக்கொண்டு அதிக ஆற்றல்களைப் பெறமுடியும்.

இரண்டாவது வகை முடுக்கிகளில் முடுக்கம் பெறவேண்டிய துகள்கள் வட்டப் பாதைகளில் 'வட்டப்பாதை முடுக்கம்' பெறுகின்றன. இவ் வெந்திரங்களில் முக்கியமானது 'சைக்ளோட்ரான்' ஆகும். இதைத் தவிர, பீட்டாட்ரான் (Betatron), சிங்ரோட்ரான் (Synchrotron), சிங்ரோ சைக்ளோட்ரான் (Synchro cycloron), ஒரு பில்லியன் அளவு ஆற்றல் கொடுக்கும் பெவட்ரான் (Bevetron) போன்ற எந்திரங்களும் இப்பொழுது உலகத்தின் பல பாகங்களில் செயலாற்றிவருகின்றன,

துகள் முடுக்கிகளை அவை செயலாற்றுகின்ற முறையைக் கொண்டு பல வகைகளாகப் பிரிக்கலாம்.

(அ) ஸ்டாடிட்ரான்கள் (Statitrons) என்று அழைக்கப்படுகின்ற நிலைமின் எந்திரங்கள்

(ஆ) ரேடியோ அதிர்வெண் நேர்க்கோட்டுத் துகள் முடுக்கிகள் (radio frequency linear accelerators)

(இ) காந்தத் தூண்டல் முடுக்கிகள் (magnetic induction accelarators)

(ஈ) காந்த ஒத்ததிர்வு எந்திரங்கள் (magnetic resonnçea machines)

இவற்றில் மிகச் சாதாரணமாகச் செயலாற்றிவருகின்ற ஒருசில துகள் முடுக்கிகளைப் பற்றிய விவரங்கள் கீழே அட்டவணைகளில் கொடுக்கப்பட்டுள்ளன.

அட்டவணை 7·1.

எலக்ட்ரான் முடுக்கிகள்

1 முடுக்கியின் பெயர்	2 முதன் முதலாக நிறுவனம் செய்யப்பட்ட வருடம்	3 தொழிற்படும் மின்புலம் E-ன் தன்மை	4 தொழிற்படும் காந்தப்புலம் H-ன் தன்மை	5 சுற்றும் பாதையின் வடிவம்	6 இன்றளவில் நிறுவப்பட்ட முடுக்கியின் பெரும ஆற்றல்
1. அடுத்தடுத்துச் செயல்படும் மின்மாற்றி X கதிர்க் குழாய் ஆய்கருவி	1930	அலைவுறும் தன்மை கொண்டது-மாறாத அதிர்வெண் 'ω' கொண்டது.	செயல்படவில்லை	...	1 மி.எ.வோ.
2. பீட்டாட்ரான்	1940	செயல்படவில்லை	மாறும் தன்மை உடையது	வட்ட வடிவப் பாதை	300 மி.எ.வோ.
3. எலக்ட்ரான் சிங்ரோட்ரான்	1945	மாறா அதிர்வெண் கொண்டது. (ω-மாறிலி)	மாறும் தன்மை கொண்டது	வட்ட வடிவம் உடையது	1,000 மி.எ.வோ.
4. நேரியல் எலக்ட்ரான் முடுக்கி	1146	அதிர்வெண் 3,000 மெகா ஹெர்ட்ஸ்	செயல்படவில்லை	நேர்கோட்டுப் பாதை	1,000 மி.எ.வோ.

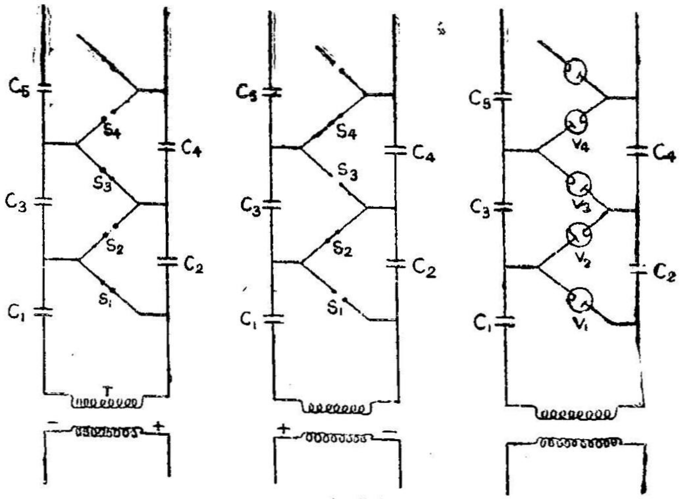
அட்டவணை 7·2.
நேர்மின் அயனி முடுக்கிகள்

முடுக்கியின் பெயர்	முதன் முதலாக நிறுவனம் செய்யப்பட்ட வருடம்	தொழிற்படும் மின்புலம் E-ன் தன்மை	தொழிற்படும் காந்தப்புலம் H-ன் தன்மை	சுற்றுப் பாதையின் வடிவம்	முடுக்கம் பெறும் துகள்கள்	இன்றளவில், நிறுவப்பட்ட முடுக்கியின் பெரும ஆற்றல்
1. நேர்த்திசை மின்னோட்ட மின்னழுத்தப் பெருக்கி	1930	மாறிலி	தொழிற்படவில்லை	நேர்க்கோடு	e, p, d, α	4 மி. எ. வோ.
2. வான்டிகிராப் நிலைமின்னியற்றி	1929	மாறிலி	தொழிற்படவில்லை	நேர்க்கோடு	e, p, d, α	10 மி. எ. வோ.
3. டாண்டம் வான்டிகிராப்	1958	மாறிலி	தொழிற்படவில்லை	நேர்க்கோடு	e, p, d, α	15 மி. எ. வோ. —புரோட்டான்களுக்கு 20 மி. எ. வோ. —ஹைடிரஜன் அயனிகளுக்கு
4 சைக்ளோட்ரான்	1931	மாறுத அதிர்வெண் கொண்டது. (அதிர்வெண்-ω)	மாறிலி	சுருள் வட்டப்பாதை	p d α கரி, நைட்ரஜன் அயனிகள்	25 மி. எ. வோ. 50 மி. எ. வோ. 80 மி. எ. வோ. 100 மி. எ. வோ.

5. சிங்ரோ சைக்ளோட் ரான்	1945	மாறும் அதிர்வெண்	மாறிலி	சுருள் வட்டப் பாதை	p	700 மி. எ. வோ.
6. புரோட்டான் சிங்ரோட்ரான் (மென் குவிப்பு)	1952	மாறும் அதிர்வெண்	மாறும் தன்மையுடையது	வட்டப் பாதை	p	10 பி. எ. வோ.
7. இரு வாட்டம் தரும் புரோட்டான் முடுக்கி (cern)	1960	மாறும் அதிர்வெண் கொண்டது	மாறும் தன்மையுடையது	வட்டப் பாதை	p	28 பி. எ. வோ.
8. இருவாட்டம் தரும் புரோட்டான் முடுக்கி (brook haven)	1961	மாறும் அதிர்வெண் கொண்டது	மாறும் தன்மையுடையது	வட்டப் பாதை	p	33 பி. எ. வோ.
9 புரோட்டான் நேரியல் முடுக்கி	1954	மாறாத அதிர்வெண் கொண்டது	தொழிற்படவில்லை	நேர்க் கோடு	p	50 மி. எ. வோ.
10. கனமான அயனி நேரியல் முடுக்கி	1954	மாறாத அதிர்வெண் உடையது $w \sim 78$ மெகாஹெர்ட்ஸ்	தொழிற்படவில்லை	நேர்க் கோடு	C^{12}, O^{16} முதலியன	10 × அயனியின் அ. நி. எ. (A)

7·3. காக்ராப்ட்—வால்டன் மின்னழுத்தப் பெருக்கி

முதன் முதலாகக் காக்ராப்ட் வால்டன் ஆகியவர்கள் வெற்றிடக் குழாய் வழியாகத் துகள்களைச் செலுத்தி அவற்றிற்கு முடுக்கம் ஏற்றி, அவற்றைப் பயன்படுத்தி அணுக்கருச் சிதைவுகளை உண்டாக்கினார்கள். அவர்கள் பயன்படுத்திய உபகரணத்தில் உள்ள முடுக்கம் விளைவிக்கும் பெரிய குழாய்களில் பெருமளவு மின்னழுத்தத்தை உற்பத்தி செய்வது பெரிதும் கடினமாக இருந்தது. அந்த மின்னழுத்தப் பெருக்கி படத்தில் (*7·1*) காட்டப்பட்டிருக்கிறது.



படம் 7·1.
காக்ராப்ட்-வால்டன் உபகரணம் செயல்படும் விதம்

அதிக மின்னழுத்த மின்மாற்றி (high tension transformer) கொடுக்கும் மின்னழுத்தத்தைப் பெருக்குவதே காக்ராப்ட்-வால்டன் கருவியின் செயலாகும்.

இது செயலாற்றும் விதம் படத்தில் காட்டியுள்ளதுபோல் வால்வுகளைத் தவிர்த்து ஸ்விட்சுகளைப் பொருத்திப் பார்த்தால் விளங்கும். அதி மின்னழுத்த மின்மாற்றி நேர்சுழற்சி (positive spin) கொண்டிருந்தால் வால்வு T_1 மின்சாரத்தைக் கடத்துகிறது. (ஸ்விட்சு S_1 மூடிக்கொள்வதுபோல) மின்தேக்கி C_1 இப்பொழுது *1,00,000* வோல்ட்டுகளுக்கு மின்னூட்டம் பெறுகிறது. ஒவ்வொரு நேர்மின் சுழற்சிக்கும் C_1 மின்னூட்டம் அடை

கிறது. ஆனால் எதிர்மின் சுழற்சியின்போது ஸ்விட்சு S_1 திறந்து S_2 மூடிக்கொள்ளுகிறது. மின்தேக்கி C_1 தன்னிடமுள்ள மின்னூட்ட மின்தேக்கி C_2-யுடன் பகிர்ந்துக்கொள்கிறது. இவ்வாறு ஸ்விட்சு S_1-ம், S_3-ம் மூடித் திறக்கின்றபொழுது C_2-ம், C_3-ம் மின்னூட்டத்தைப் பகிர்ந்துகொள்ளுகின்றன. இவ்வாறு $V_2, +4,00\,000$ வோல்ட்டு மின்னழுத்தத்தையும் பெறுகின்றன. வால்வு T_1, T_2 மின்தேக்கிகள் C_1, C_2 ஆகியவை சேர்ந்து ஒரு படி மின் சுற்றாக வேலை செய்கிறது. இது மின்னழுத்த இரட்டிப்பு (voltage double) என்றழைக்கப்படுகிறது. இதைப் போல அனேக மின்னழுத்த இரட்டிப்புகளை ஒன்றுசேர்த்துக் காக்ராஃப்ட், வால்டன் என்ற விஞ்ஞானிகள் 7,00,000 வோல்ட்டுகள் வரை மின் அழுத்தத்தைப் பெருக்கிப் புரோட்டான் கதிர்க் கற்றைகளை 10 மி. எ. வோ. ஆற்றல்வரை முடுக்கி வெற்றி பெற்றனர்.

காக்ராப்ட், வால்டன் இருவரும் முதன் முதலாக 150 KV முடுக்கும் மின்னழுத்தத்தைப் (accelerating voltage) பயன்படுத்தி அதில் ஹைடிரஜன் அயோனி மூலத்தையும், லிதியம் ஆக்ஸைடு இலக்கையும் பயன்படுத்திப் புரோட்டான்களை உற்பத்தி செய்தார்கள். இந்தப் புரோட்டான்கள் வெற்றிடமாக்கப்பட்ட குழாய்கள் வழியாகச் செலுத்தப்பட்டு, முடுக்கம் பெற்று இலக்கை மோதுகின்றன. இம் மோதலினால் 92·7 விழுக்காடு உள்ள Li^7 மூலகம் இரண்டு துண்டங்களாகப் பிளவு படுகின்றது.

$$_3Li^7 + {}_1H^1 \longrightarrow {}_2He^4 + {}_2He^4 + Q$$

மோதுகின்ற புரோட்டான்களின் ஆற்றலை அதிகப்படுத்தினால், மோதலினால் ஏற்படும் மேற்கூறிய செயலீட்டின் (reaction) விழுக்காடும் அதிகமாகும் என்பது புலனாகின்றது. இந்த (p, α) செயலினால் கிடைக்கும் ஆற்றல் மிக அதிகமாக இருக்கின்றது. இதனைக் கீழே காணலாம்.

$_3Li^7$-ன் நிறை = 7·01822 அ. நி. அ.

$Li^7\ (P, \alpha)\ He^4$ செயலில் Q-ன் மதிப்பைக் கண்டுபிடி.

H_1, He^4 ஆகியவற்றின் நிறைகளை வாய்பாட்டிலிருந்து எடுத்துக் கையாள்க.

7·01822	4·00387
1·00815	4·00387
8·02637	8·00744 + Q.

∴ $Q = 0{\cdot}01863$ அ. நி. அ.

அல்லது 17·347 மி. எ. வோ.

Li^7 கரு, 440 கிலோ எலக்ட்ரான் வோல்ட்டு புரோட்டான்களால் மோதப்படும்பொழுது ஏற்படும் சிதைவினால் நமக்கு 8·8 மி. எ. வோ. ஆற்றல் படைத்த இரு α துகள்கள் கிடைக்கின்றன.

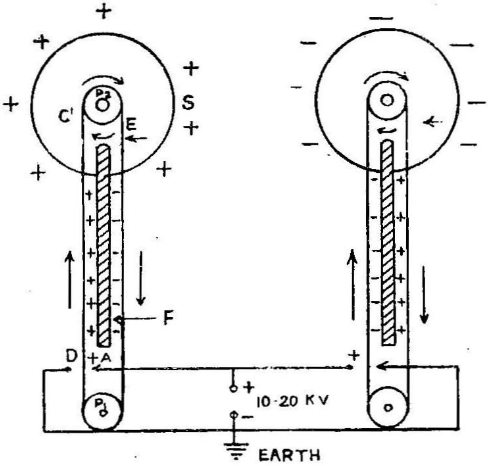
7·4. வான்டி கிராப் நிலைமின் இயற்றி

(Vande graff Generator)

உள்ளீடற்ற உலோகக் கோளம் ஒன்றினுள் மின்னூட்டம் பெற்ற ஒரு துகள் வைக்கப்பட்டிருப்பதாகக் கொள்வோம். மின்னூட்டமுடைய பொருளொடு கோளத்தை இணைத்தோமானால், பொருளின் மின்னூட்டமெல்லாம் கோளத்திற்கு மாற்றப்பட்டு அதன் மேற்பரப்பில் தங்கும். இப்பொழுது பொருள் அகற்றப்பட்டு மறுபடியும் மின்னூட்டம் ஊட்டப்பெற்றுக் கோளத்திற்குள் செலுத்தப்படுமானால், கோளத்தின் மேற்பரப்பில் இன்னும் அதிகமான மின்னூட்டம் சேகரிக்கப்படும். இவ்வாறே தொடர்ந்து நடைபெற்றால் கோளத்தின் மேற்பரப்பில் அதிக அளவு மின்னூட்டம் நிலைத்து நிற்கும். இத் தத்துவத்தைக் கொண்டுதான் வான்டி கிராப் என்பவர் 'வான்டி கிராப் மின்னியற்றி' என்று அவர் பெயராலேயே அழைக்கப்படும் ஒரு துகள் முடுக்கியை நிறுவினார். அதன் அமைப்பு படம் 7·2-ல் காட்டப்பட்டுள்ளது.

இந்த முடுக்கியில் B என்ற ஒரு தொடர்ச்சியான ரப்பர், பட்டு, லினன் அல்லது காகிதம் போன்ற அரிதிற் கடத்தியினாலான பட்டை, P_1, P_2 என்ற இரு கப்பிகளின்மேல் படத்தில் காட்டியபடி செல்கிறது. P_1 என்ற கப்பி பூமியின் மின்னழுத்தத்தில் இருக்கிறது. இது ஒருமின் மோட்டாரால் சுற்றப்படுகிறது. P_2 என்ற கப்பி உள்ளீடற்ற, உலோகத்தாலான, அதிக ஆரம் கொண்ட ஒரு கோளத்தினுள் பொருத்தப்பட்டிருக்கிறது. இந்த உள்ளீடற்ற கோணம் மின்னியற்றியின் மற்றப் பாகங்களிலிருந்து நன்கு மின்காப்பு இடப்பட்டிருக்கிறது. பொறி வேலை செய்யும் போது பட்டையின் பக்கவாட்டில் மின்னியற்றியிலிருந்து மின்னூட்டம் தெளிக்கப்படுகின்றது. இப் பட்டை மேல் நோக்கி நகருகின்றது. மின்னியற்றியிலிருந்து மின்னூட்டம் A_1 என்ற கூர்மையான ஊசிகளிலிருந்து பட்டைக்கு மாற்றப்படுகிறது. பட்டை மேலே சென்றவுடன் A_2 என்ற கூர்மையான ஊசிகளின் மூலம் மின்னூட்டம் அதிலிருந்து அகற்றப்பட்டுக் கோளத்துடன் இணைக்கப்படுகிறது. இவ்வாறு சேர்க்கப்பட்ட மின்னூட்டம்

கோளத்தின் மேற்பரப்பில் பரவுகின்றது. இப்பொழுது மின்னூட்டம் இழந்த பட்டையானது P_2-விலிருந்து P_1-க்கு மறுபடியும் வருகிறது. பட்டை மின்னியற்றியில் மின்னூட்டம் பெற்று P_2-க்குத் திரும்பவும் சென்று கோளத்திற்கு மின்னூட்டத்தைத் திரும்பவும அளிக்கிறது. இந் நிகழ்ச்சி தொடர்ந்து நடைபெறுவதால் கோளத்தின்மேல் சேகரிக்கப்படும் மின்னூட்டம் அதிகமாகிக் கொண்டே வருகிறது. அதனுல், அதன் மின்னழுத்தமும் அதிகமாகிறது. C என்பது உள்ளீடற்ற கோளத்தின் மின் ஏற்புத் திறன் எனவும், Q என்பது ஒரு குறிப்பிட்ட நேரத்தில் கோளத்



படம் 7·2
வான்டிகிராப் நிலைமின்னியற்றி இயங்கும் தத்துவத்தை விளக்கும் படம்

தின்மீதுள்ள மின்னூட்டம் எனவும் கொண்டால், அதன் மின்னழுத்தம் $V = Q/C$ ஆகும். வான்டிகிராப் மின்னியற்றியைக் கொண்டு ஒரு குறிப்பிட்ட அளவுக்குமேல் மின்னழுத்தம் ஏற்படுத்த முடியாது. ஏனெனில் இப் பொறியைச் சுற்றிச் சுவர், கூரை போன்றவை அருகில் உள்ளதால் குறிப்பிட்ட அளவிற்கு மேல் மின்னிறக்கம் (discharge) ஏற்பட ஏதுவாகிறது. ஒரு குறிப்பிட்ட அளவு மின்னழுத்தம் பெறுவதற்கு வேண்டியபடி இப் பொறியின் அளவைக் குறைப்பதற்கும், மேற் கூறிய இடர்ப்பாட்டைத் தவிர்ப்பதற்கும், இப் பொறி அதிக அழுத்தம் கொண்ட காற்றினுல் சூழப்பட்டு, ஓர் எஃகுக் கொள்கலத்தில் வைக்கப்பட்டுள்ளது. இப் பொறிகளைக் கொண்டு ஏறத்தாழ

10 மி. எ. வோ. மின்னழுத்தம், ஆறிலிருந்து எட்டு மைக்ரோ ஆம்பியர் மின்னோட்டம் உடைய புரோட்டான்களைப் பெறலாம்.

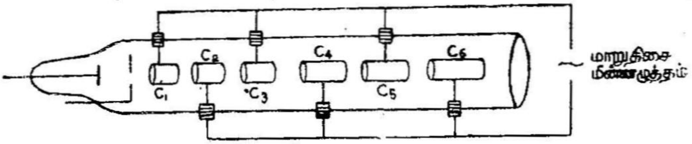
அண்மையில் 22 மி.எ.வோ. ஆற்றல் அளவிற்கு மின்னழுத்தம் கொடுக்கும் 'டாண்டம் இயற்றிகள்' (Tandam generators) நிறுவப் பட்டிருக்கின்றன. இப் பொறிகளில் 5 மி. எ. வோ. ஆற்றல் உள்ள எதிர்மின் அயனிகள் தோற்றுவிக்கப்பட்டு, அவற்றிலி ருந்து எலக்ட்ரான்கள் பிரிக்கப்படுகின்றன. எஞ்சிய நேர்மின் அயனிகள் எதிர்த்திசையில் தள்ளப்பட்டு வந்த வழியே செலுத் தப்படுகின்றன. இதனால் அவற்றின் ஆற்றல் இரு மடங்காக்கப் படுகிறது. ஒரு பொறியின் ஆற்றல்போலப் பல மடங்கு ஆற்றல் கொடுக்கும் பொறிகளும் இன்னும் சில வருடங்களில் நிறுவப் படலாம் என எதிர்பார்க்கப்படுகிறது.

7·5. நேரியல் துகள் முடுக்கி (Linear accelerator)

மின்னூட்டம் பெற்ற துகள் ஒன்று, மின்புலம் ஒன்றின் வழி யாகச் செல்லும்போது, திசைவேக மாற்றம் ஏற்படுகிறது. காட்டாக மின்னறைக் குழாய் ஒன்றில் ஓர் எலக்டரான் எதிர்மின் வாயிலிருந்து நேர்மின் வாய்க்குச் செல்கின்றபொழுது அதன்மீது செயல்படும் மின்புல அழுத்தத்தைப் பொறுத்து முடுக்கம் பெறுகின்றது. இவ்வாறே நேர் மின்னூட்டம் கொண்ட துகள் எதிர்மின்வாய்க்குச் செல்கின்றபொழுதும் முடுக்கம் பெறுகின்றது. அதிக அழுத்தம் கொண்ட மின்புலத்தைப் பயன் படுத்தாமல், தொடர்ந்து செயல்படுகின்ற குறைந்த மின் அழுத் தங்களைக் கொண்டும் துகள்களை முடுக்கலாம். இதனை முதன் முதலாகப் பயன்படுத்தி R. விடோரோ என்பவர் நேரியல் துகள் முடுக்கி ஒன்றை நிறுவினர். இது பிறகு லாரன்ட்ஸ் என்ப வர் நிறுவிய சைக்ளோட்ரான் என்ற வட்டப்பாதை முடுக்கிக்கு (cyclic accleratous) முன்னோடியாக அமைந்தது என்று சொல்வது மிகையாகாது.

இதன் அமைப்பு படம் 7·3-ல் காட்டப்பட்டுள்ளது. இதில் தொடர்ந்து அதிகரித்துக்கொண்டே வரும் நீளங்களை உடைய பல உருளைக்குழாய்கள் ஒரு நேர்க்கோட்டில் அமைக்கப்பட்டிருக் கின்றன. ஒன்று விட்டு ஒன்று குழாய்கள் ஒருங்கே இணைக்கப் பட்டுள்ளன. முதலாவது, மூன்றாவது, ஐந்தாவது என்ற முறை யில் இணைக்கப்பட்ட குழாய்கள் ரேடியோ அதிர்வெண் மாறு திசை மின்னோட்டத் தோற்றுவாயின் ஒரு முனையோடும், இரண்டு, நான்கு, ஆறாவது குழாய்கள் மற்றொரு முனையோடும் இணைக்கப் பட்டுள்ளன. S-விருந்து வெளியேறும் அயனிகளுக்கு உரிய

காலத்தில் மின் துடிப்புகள் உந்தத்தைக் கொடுக்கின்றன. காட்டாக 1, 3, 5 உருளைகள் நேர்மின்னூட்டம் அடையும்பொழுது மற்ற உருளைகள் எதிர்மின்னூட்டம் அடைகின்றன. இது தொடர்ந்து மீண்டும் மீண்டும் நடைபெறுகின்றது. நேர்மின்னூட்டமுடைய அயனிகள் S என்ற மின்வாயிலிருந்து புறப்பட்டு C_1 என்ற உருளை வழியாகச் சென்று C_1-க்கும், C_2-க்கும் உள்ள இடைவெளியை வந்தடைகின்றன. இந்த இடைவெளியில் துகள் முடுக்கம் பெறுமாறு மின்னழுத்தங்கள் அமைக்கப்பட்டிருப்பதால் அவை, முன்பு இருந்ததை காட்டிலும் அதிகமான



படம் 7·3.
நேரியல் துகள் முடுக்கி
9—C6—நீளங்கள் அதிகமாகிக்கொண்டே வரும் குழாய்கள்

ஆனல் சீரான திசைவேகத்துடன் C_2 உருளையை அடைகின்றன. திசைவேகம் அதிகமானலும், அவற்றின் ஊடே துகள் செல்கின்ற நேரம் ஒரே அளவாக இருக்குமாறு உலைகளின் நீளங்கள் அமைக்கப்பட்டிருக்கின்றன. உருளைகளின் வெளியே துகள்கள் வரும்போது மறுபடியும் அதே திசையில் உந்தம் பெறுகின்றன. இதனல்தான் இந்த முடுக்கியிலுள்ள குழாய்களின் நீளம் ஒன்றிற்கொன்று அதிகமாகிக்கொண்டுவருகின்றது. இத்தகைய துகள் முடுக்கிகளைக் கொண்டு நாம் சுமார் 50 மி.எ.வோ. அளவிற்குப் புரோட்டான்களை முடுக்கம்பெறச் செய்யமுடியும்.

ரேடியோ அதிர்வெண் கொண்ட மாறுதிசை மின்னோட்டத்தின் அலைவு காலம் ζ எனக் கொள்க. அரை அலைவுக்கான நேரம் $\zeta/2$ ஆகும். இந்த நேரத்தில் துகளானது ஓர் உருளையிலிருந்து புறப்பட்டு அடுத்த உருளையை வந்தடைகிறது. உருளை இடைவெளி இவற்றின் மொத்த நீளம் l எனவும், துகளின் திசை வேகம் v எனவும் கொண்டால்,

$$l = v.\ \zeta/2\ ; \qquad v/2f$$

இதில் f என்பது மாறுதிசை மின்னோட்ட மின்புலத்தின் அதிர்வெண்ணைக் குறிக்கிறது. மின்புல அழுத்தம் V ஆகவும் மின்னூட்டம் e ஆகவும் இருக்குமானல், ஒவ்வோர் இடைவெளியிலும் துகள் பெறுகின்ற ஆற்றல் Ve ஆகும்.

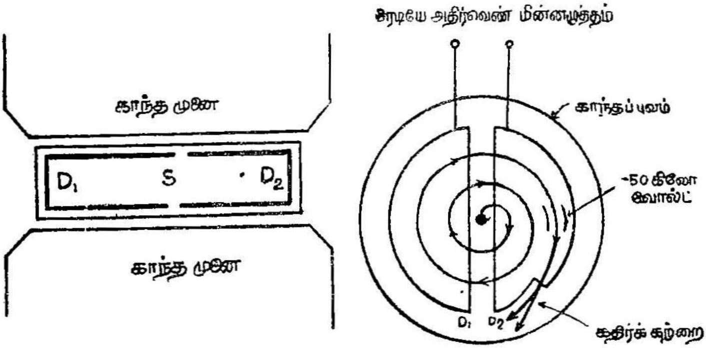
7·6. லாரென்ஸின் சைக்ளோட்ரான் (Lawrance Cyclotron)

நேரியில் முடுக்கிகளின் இடர்ப்பாடு, அவற்றிலுள்ள மின் வாய்கள், குழாய்கள், இவைகளின் நீளம் ஆகியவை. எனவே, அதிக நீளங்களை உடைய குழாய்கள் மற்றும் மின் வாய்களை அமைப்பது மிகக் கடினமாக இருந்தது. அதனால், துகள்களை நேர்க் கோட்டுப் பாதையில் செலுத்தாமல் சுருள் சுருளான வட்டப் பாதைகளில் செலுத்தினால் மேற்கண்ட இடர்ப்பாட்டை நீக்க லாம். 1930ஆம் ஆண்டு லாரென்சு என்பார் விதரோவின் நேரியல் முடுக்கியை ஒரு வட்டப்பாதை முடுக்கியாக மாற்றி வெற்றிக் கண்டார். மின்னூட்டம் கொண்ட துகள்களை காந்தப் புலத்தின் துணை கொண்டு சுருள்பாதைகளின் வழியாகச் செலுத்தி முடுக்கம்பெறச் செய்தார். சைக்ளோட்ரானின் அமைப்பு படம் 7·4-ல் காட்டப்பட்டிருக்கிறது.

S என்ற கதிரியக்க மூலப் பொருள்களிலிருந்து வரும் எலக்ட்ரான்கள் அதைச் சுற்றியுள்ள வாயுவில் அயனியாக்கம் ஏற் படுத்துகிறது. வாயுவில் தோற்றுவிக்கப்பட்ட அயனிகள் காந்தப் புலத்தினால் வளைக்கப்பட்டு 'டி'க்கள் ('D'க்கள்) என்றழைக்கப்படும் D போன்ற வடிவமுள்ள இரண்டு உள்ளீடற்ற கடத்திகளின் வழி யாகச் செலுத்தப்படுகின்றன. 'D'க்கள் இரண்டும் குறைந்த அழுத்தத்தில் வைக்கப்பட்டிருக்கும் ஹைடிரஜன் வாயு கொண்ட கலத்துள் வைக்கப்பட்டிருக்கின்றன. இதிலிருந்து நமக்குப் புரோட்டான்கள் கிடைக்கின்றன. 'D'க்கள் அமைக்கப்பட்ட இடத்திலும், அவற்றின் செங்குத்துப் பரப்பிலும் ஒரு சீரான காந்தப்புலம் செயல்படுமாறு அவற்றைச் சுற்றி ஒரு காந்தம் அமைக்கப்பட்டுள்ளது. ஒரு D நேர்மின்னூட்டம் அடையும் போது மற்ற D எதிர்மின்னூட்டம் அடையுமாறு இரண்டும் ஒரு ரேடியோ அதிர்வெண் அலைவியின் இரு முனைகளோடு இணைக்கப் பட்டுள்ளன. எவ்வாறு நேரியல் முடுக்கியில் துகளானது ஒரு நகர்வுக் குழாயிலிருந்து அடுத்த குழாய்க்குச் செல்லும்போது மின்னழுத்தம் மாறுபடுகிறதோ, அவ்வாறே இக் கருவியிலும் அயனி ஒரு 'D'யிலிருந்து மற்றோர் 'D'-க்குச் செல்லும்போது மின்னழுத்தம் மாறுபடுகிறது. எனவே ஒரு 'D_1'-லிருந்து மற்றோர் 'D_2'-க்குச் செல்லும்போது இடைவெளியில் முடுக்கம் பெற்று D_2-ஐ அடைந்தவுடன் ஓர் அரைவட்டப் பாதையில் இயங்குகிறது. பிறகு D_2-யிலிருந்து D_1-க்குச் செல்கின்ற பொழுது இடையில் முடுக்கம் பெற்று D_1-க்குச் சென்று வட்டப் பாதையில் இயங்குகிறது. இது ஒவ்வொரு சுற்றிலும் தொடர்ந்து நடைபெறுகிறது. ஒவ்வொரு முறையும் அயனி முடுக்கம்

பெறுவதால் திசைவேகம் அதிகமாகிறது. எனவே, அயனியின் சுற்றுப் பாதையும் அதிகமாகிக்கொண்டே வந்து இறுதியில் 'D'-யில் 'P' என்ற இடத்திலிருந்து வெளியேறுகின்றது.

நிறை m_1, மின்னூட்டம் e கொண்ட ஒரு அயனி H என்ற காந்தப் புலத்தில், r ஆரம் கொண்ட வட்டப் பாதையில் v என்ற வேகத்தோடு செல்கின்றபொழுது அயனியின் மைய விட்டோடு விசையும், காந்தப்புலத்தின்பொருட்டு அதன்மீது செயல்படும் விசையும் சமமாக இருக்குமாதலால்,



(a) செங்குத்துக் குறுக்கு வெட்டு பிம்பம் (b) கிடைப்படம்

படம் 7·4

லாரென்ஸின் சைக்ளோட்ரான்

$$\frac{mv^2}{r} = Hev. \qquad \ldots \quad (7{\cdot}1)$$

அல்லது

$$v = \frac{Her}{m} \qquad \ldots \quad (7{\cdot}2)$$

ஒரு 'D'-யில் அயனியின் பாதை நீளம் $= \frac{1}{2}\, 2\pi r = \pi r$. T என்பது அலைவியின் அலைவு காலமாக இருந்தால் ஒவ்வொரு 'D'-யிலும் அயனி செல்கின்ற நேரம் $T/2$ ஆகும். தவிரவும்,

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{He} \qquad \ldots \quad (7{\cdot}3)$$

துகள் ஒரு D-யில் அரைவட்டப் பாதையில் ஓட எடுத்துக் கொள்ளும் நேரம் துகளின் திசைவேகத்தையோ அல்லது சுற்றுப் பாதையின் ஆரத்தையோ பொறுத்ததல்ல என்று தெரிகிறது. அதாவது, எல்லா அயனிகட்கும் இது சமமே எனத் தெரிகிறது.

இருப்பினும் பாதையின் ஆரம் அயனியின் திசைவேகத்திற்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது. எனவே, அதிகத் திசைவேகம் கொண்ட துகள்கள் சுற்றும் நேரமும்(அதிக ஆரம் கொண்ட பாதை வழியாக) குறைந்த திசைவேகம் கொண்ட துகள்கள் சுற்றும் நேரமும் ஒன்றே. அயனி பெரும ஆரத்தை அடைகின்றபொழுது எதிர் மின்னழுத்தமுடைய விலக்கம் ஏற்படுத்தும் மின்வாயின் உதவியால் *P*-யினின்றும் அதிக ஆற்றல் பெற்ற ஒரு கற்றையாக வெளியேற்றப்படுகிறது.

சைக்ளோட்ரானுல் முடுக்கம் பெறுபவை பெரும்பாலும் புரோட்டான்கள், டியூட்ரான்கள், α துகள்கள் ஆகியவைகள் தாம். துகள் பெரும் ஆற்றல் '*D*'-க்களின் பரிமாணத்தைப் பொறுத்தது. ஏனெனில், துகள் அடையும் பெருமத் திசைவேகம் '*D*'-யின் ஆர அளவுள்ள சுற்றுப் பாதையின் நீளத்தைப் பொறுத்தது. சுற்றுப் பாதையின் ஆரம் *r*-க்குப் பதில் '*D*'-யின் ஆரமான *Rd* என்பதைச் சரியீடு செய்தால்,

$$v_{max} = \frac{He\,Rd}{m} \qquad \dots \quad (7{\cdot}4)$$

$$E_{max} = \tfrac{1}{2}\,mv^2{}_{max} = \tfrac{1}{2}\,m\left[\frac{He\,Rd}{m}\right]^2$$

$$= \frac{H^2\,Rd^2}{2} = \frac{e^2}{m} \qquad \dots \quad (7{\cdot}5)$$

பல சைக்ளோட்ரான்களில் ஏறத்தாழ 15 *K* காஸ் காந்தப் புலங்களும் ஏறத்தாழ 12 *MHZ* (மெகா ஹெர்ட்ஸ் = மெகா சைகிள்ஸ்/வினடி) அதிர்வெண்களும் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. பொறியின் பரிமாணத்தைக் குறிப்பிடுவதற்குப், பெரும்பாலும் காந்த முனை முகப்புகளின் விட்டங்களின் அளவுகளையே கூறுவது வழக்கம். சில சைக்ளோட்ரான்கள் 60" காந்தமுனை விட்டம் கொண்டுள்ளன. சில ஆண்டுகளுக்கு முன் ரஷ்யாவில் நிறுவப்பட்ட சைக்ளோட்ரான் 6 மீட்டர் காந்தமுனை விட்டம் கொண்டது. இது சுமார் 680 மி.எ.வோ. ஆற்றல்கொண்ட புரோட்டான்களைத் தர வல்லது.

எடுத்துக் காட்டு-1

பெரும ஆரம் 25", அதிர்வெண் 12 *MHZ* கொண்ட சைக்ளோட்ரானைப் பயன்படுத்தினல், புரோட்டான்கள் டியூட்ரான்கள் ஹீலியம் ஆகியவற்றின் அயனிகள் இவற்றிற்கு எந்த அளவு பெரும ஆற்றல் கிடைக்கும்? ஒவ்வொரு துகளுக்கும் தேவையான காந்தப்புலத்தின் செறிவு எவ்வளவு?

புரோட்டானுக்கு

$e = 1{\cdot}602 \times 10^{-9}$ கூலும்

$m = 1{\cdot}672 \times 10^{-27}$ கி. கிராம்.

$$\left(\frac{e}{m}\right)_p = \frac{1{\cdot}602 \times 10^{-19}}{1{\cdot}672 \times 10^{-27}} = 0{\cdot}956 \times 10^{8} \text{ கூலும்/கி. கி.}$$

$$\nu = \frac{H}{2\pi}\left(\frac{e}{m}\right)$$

$$\nu = 12 \times 10^{6} \text{ Hz}$$

$$\therefore \quad H = \frac{2\pi\nu}{\frac{e}{m}} = \frac{2\pi \times 12 \times 10^{6}}{{\cdot}956 \times 10^{8}}$$

$$= {\cdot}74 \text{ டெஸ்லா}$$

$$E \max = 2\pi^2\nu^2R^2m$$

$$= \frac{2\pi^2 \times (12 \times 10^{6})^2 \times \left(\frac{25 \times 2{\cdot}54}{100}\right)^2 \times 1{\cdot}672 \times 10^{-27}}{1{\cdot}602 \times 10^{-13}}$$

$$= 11{\cdot}59 \text{ மி. எ. வோ.}$$

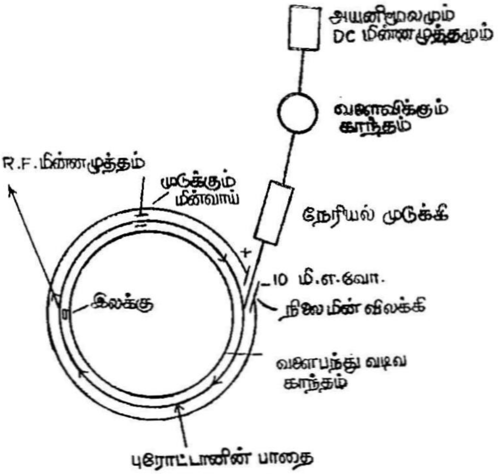
இவ்வாறே டியூட்ரானுக்கும், ஹீலியம் கருவிற்கும் ν-ன் மதிப்பையும் E max-ன் மதிப்பையும் கணக்கிடுக.

7·7 ஸிங்ரோ சைக்ளோட்ரான் அல்லது சிங்ரொட்ரான் (Synchro-cyclotron or Synchrotron)

சைக்ளோட்ரானைப் பயன்படுத்தித் துகள்களை முடுக்கும் போது அதன் திசைவேகம் அதிகமாகிக்கொண்டேவருகிறது. துகள்களின் திசைவேகங்கள் ஒளியின் திசைவேகத்தை நெருங்கும்போது அவற்றின் நிறைகள் மாறுகின்றன. இது தனிச் சார்பியல் கொள்கைகளிலிருந்து பெறப்படும் உண்மை. காட்டாக முடுக்கப்படும் துகளின் திசைவேகம் $\nu = 0{\cdot}8c$ ஆக இருக்கும் போது அதாவது $\left(1 - \frac{\nu^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}} = 0{\cdot}6$ ஆகும்போது, துகளின் நிறை $m = 1{\cdot}66\ m_o$ ஆக அதிகரிக்கின்றது. இதில் m_o என்பது துகளின் அமைதிநிலை நிறை. எனவே $\nu = 0{\cdot}8c$ திசைவேகம் கொண்ட துகளின் நிறை 1·66 மடங்கு அதிகரிக்கின்றது. இப்பொழுது

ஒரு சுற்றுக்கான நேரம் $T = 2\pi m / He$ என்பதில் m அதிக மாகும்போது ஒரு சுற்றுக்கான நேரமும் அதிகரிக்கின்றது. ஆகையால் 'D'க்களின்மீது செயல்படும் ரேடியோ அதிர்வெண் கொண்ட மின்னழுத்த வேறுபாடும், சுற்றுகின்ற துகளும் கட்ட வேறுபாடு அடைகின்றன. இதைச் சரிசெய்ய, 'D' க்களின்மீது செயல்படும் மின்னழுத்த வேறுபாட்டைத் தகுந்தாற்போல் குறைக்க வேண்டும். அல்லது காந்தப் புலத்தின் செறிவையாவது m/H மாறிலியாக இருக்கும்வண்ணம் அதிகப்படுத்த வேண்டும்.

மேற்கண்ட தத்துவத்தைப் பயன்படுத்தி நிறுவப்பட்ட துகள் முடுக்கி "சிங்ரோ சைக்ளோட்ரான்" அல்லது 'சிங்ரோட்ரான்' என்றழைக்கப்படுகிறது. இது படம் 7·5-ல் காட்டப்பட்டுள்ளது.

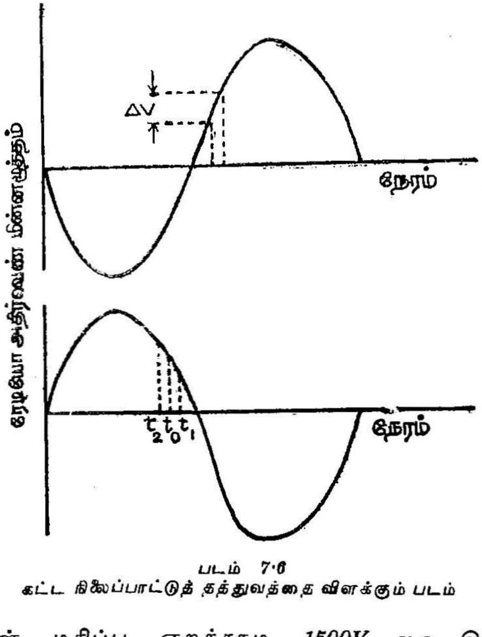


படம் 7·5
சிங்ரோட்டான் அமைப்பு

முடுக்கம் பெறவேண்டிய புரோட்டான்கள் பொறிக்கு வெளியே உற்பத்தியாகின்றன. இவை முதற்கண் 500 KV நேர் மின்னழுத்தத்தால் முடுக்கப்பட்டு இரண்டாவதாக 10 மி.எ.வோ. நேரியல் முடுக்கிகளால் முடுக்கப்படுகின்றன. 10 மி.எ.வோ. அளவிற்கு முடுக்கம் பெற்ற புரோட்டான்கள் இப்பொழுது மிகச் சிறிய அளவு காந்தப்புலம் கொடுக்கும் சிங்ரோட்ரான் காந்தத்துள் செலுத்தப்படுகின்றன. துகள்கள்மீது செயல்படும் காந்தப் புலம் வளைந்து பந்து வடிவ (doughnut shaped) காந்தப்புல

வெளியில் வட்டப்பாதையில் செல்லுமாறு விலக்கமடையச் செய் கிறது. துகள்கள் காந்த வெளியில் செல்கின்றபொழுது காந்தம் செயல்பட ஆரம்பிக்கின்றது. அதனால், புரோட்டான் சுற்றுப் பாதைகள் சுருக்கமடைந்து இரண்டாம் முறை சுற்றும்போது விலக்கியை வந்தடைய நேரிடுகிறது.

குழாய் வடிவமுள்ள முடுக்கிக்குழாயின் மின்வாய்க்கு ஒரு திசைமாற்ற மின்னழுத்தம் கொடுக்கப்படுகின்றது. புரோட்டான்கள் இந்த மின்வாயை t_1 நேர அளவில் அடைந்து t_2 நேர அளவில் அதை விட்டுச் செல்கின்றன. இந்த நேர இடைவெளியில், படம் 7·6-ல் காட்டியபடி அவை ΔV மின்னழுத்த அளவிற்கு முடுக்கம் பெறுகின்றன.



படம் 7·6
கட்ட நிலைப்பாட்டுத் தத்துவத்தை விளக்கும் படம்

ΔV-ன் மதிப்பு ஏறத்தாழ 1500V ஆக இருக்கலாம். துகள்கள் முடுக்கடையும்பொழுது அவற்றின் நிறை m-ம் அதிகமாகிறது. இப்பொழுதும் m/H-ன் மதிப்பு மாறிலியாக இருக்கும் வண்ணம் காந்தப் புலம் H-ன் மதிப்பும் அதிகமாகிறது. புரோட்டான்களின் திசைவேகம் ஒளியின் திசைவேகத்திற்குச் சமமாக அதிகரித்துக்கொண்டே வரும்பொழுது, ஒரு சுற்றிற்கு அவை

எடுத்துக்கொள்ளும் நேரம் குறைந்துகொண்டே வருகிறது. அதனல் முடுக்கி மின்வாயில் செயல்படும் அலைவுறும் மின்னழுத்தத்தின் அதிர்வெண்ணும் அதற்கேற்றவாறு அதிகரித்துக் கொண்டேவருகிறது.

காந்தப் புலத்தின் செறிவு பெரும மதிப்பை அடைகின்ற பொழுது, முடுக்கி மின்னழுத்தம் நிறுத்தப்பட்டு, புரோட்டான்களின் சுற்றுப் பாதையில் இலக்கு தள்ளப்படுகின்றது. வெற்றிடமாக முடுக்கிக் கலத்திலுள்ள மெல்லிய தகட்டைப் பொருத்தி, முடுக்கியிலிருந்து சிதறலுற்ற புரோட்டான், நியூட்ரான், வெவ்வேறு வகை மீசான்கள் கொண்ட கற்றைகளைப் பெறலாம். இறுதியாகக் காந்தப்புல மின்னோட்டம் நிறுத்தப்படுகிறபொழுது காந்தப்புலம் பழைய நிலையை அடைகிறது. இப்பொழுது முடுக்கியானது இன்னுமொரு முறை துகள்களைப் பெற்று முடுக்கிவிடத் தயாராக இருக்கின்றது. ஒவ்வொரு கற்றையும் ஏறத்தாழ 10^{11} துகள்களைக் கொண்டிருக்கின்றன. இது போன்ற கற்றைகள் 6 வினடிகளுக்கு ஒரு முறை முடுக்கியினின்றும் வெளியேற்றப் படுகின்றன.

சிங்ரோட்ரானில் செயல்படும் கட்ட நிலைப்பாடு (phase stability) கீழ்க்கண்டவாறு பெறப்படுகின்றது. துகளின் ஒரு சுற்றுக்கான கால அளவுக்கு ஏற்றாற்போல் அலைவியின் அதிர்வெண்ணைச் சரிசெய்வதன்மூலம் 'கட்ட நிலைப்பாடு நிறுவப்படுகிறது. நடைமுறையில் மின்னூட்டம் பெற்ற துகள் t_0 என்ற நேர அளவில் (படத்தில் காட்டியிருப்பது போல) முடுக்கத்தைப் பெறுகின்றது. இப்பொழுது துகள் அலைவி மின்னழுத்தத்தோடு கட்ட நிலைப்பாடும் இருக்குமானல் அது சரியான நேரத்தில் மின்வாயை அடைந்து அளவான ஆற்றல் ஏற்பு அடையும். ஆனல், துகள் சிறிது நேரம் கழித்து t_1 அளவில் வந்தடையுமானல் மின்னழுத்தத்தின் மதிப்பு குறைந்து அதன் முடுக்க ஆற்றலும் குறைந்துவிடுகிறது. எனவே, துகளின் நிறையும் அதற்கேற்றவாறு குறைகிறது. இப்பொழுது துகள் அதிகத் திசைவேகத்தோடு இயங்கி, t_0 நேர அளவில் செயல்படும் மின்னழுத்தத்தை ஏற்குமாறு மின்வாயை வந்தடைகின்றது. t_0-க்கு அதிகமான அல்லது குறைவான நேர அளவில் துகள் மின்வாயை வந்து அடைந்தால், அதன் நிறை அதிகமாகிறது. அதனல், அது மெதுவாக இயங்கத் தலைப்பட்டு t_0 நேர அளவிற்கு வருவதற்கு அதிக நேரம் எடுத்துக்கொள்கிறது. எனவே, துகள் நேரங்கழித்தோ அல்லது முன்கூட்டியோ வந்தடைவதால் ஏற்படும் கட்ட வேறுபாடு தானகவே மாற்றப்பட்டு மின்னூட்டம் கொண்ட துகள்

களின் சுற்று செயல்படும் அலைவும் மின்னழுத்தத்தோடு 'கட்ட நிலைப்பாடு' உண்டாக்கப்படுகிறது. இதன்பொருட்டுதான் இப் பொறி சிங்ரோட்ரான் என்றழைக்கப்படுகிறது. ரஷ்யர்களும் மற்றும் சிலரும் இப் பொறியை ஃபேசொட்ரான் (Phasotron) என்றழைக்கின்றனர். இதனைப் பயன்படுத்தி அனேக பில்லியின் எலக்ட்ரான் வோல்ட்டு ஆற்றல்களைப் பெறலாம். ஆகையால், இது சில சமயங்களில் பெவட்ரான் என்றும் அழைக்கப் படுகிறது.

மாதிரிக் கணக்கு 2

வழிகாட்டிப் புலச் செறிவு 1·5 வீபர்கள்/மீட்டர்^{2} கொண்ட, 10 Gev ஆற்றல் கொண்ட துகள்களைக் கொடுக்கும் ஒரு புரோட் டான் சிங்ரோட்ரானின் ஆரம் எவ்வளவு இருக்கும்?

10 Gev இயக்கஆற்றல் கொண்ட புரோட்டான்களின் சம நிறையைக் கீழ்க்கண்டவாறு கணக்கிடலாம்.

10 Gev + அமைதிநிலை நிறை

$$= 10 + 0{\cdot}931 = 10{\cdot}931 \text{ Gev}$$

$$\simeq 11{\cdot}75 \text{ அ. நி. அ.}$$

$$= 11{\cdot}75 \times 1{\cdot}66 \times 10^{-24} \text{ கிராம்}$$

$$= 1{\cdot}95 \times 10^{-26} \text{ கிலோ கிராம்}$$

இப்பொழுது

$$R = \frac{mv}{He}$$

$$= \frac{1{\cdot}95 \times 10^{-26} \times 3 \times 10^{8}}{1{\cdot}5 \times 1{\cdot}6 \times 10^{-19}}$$

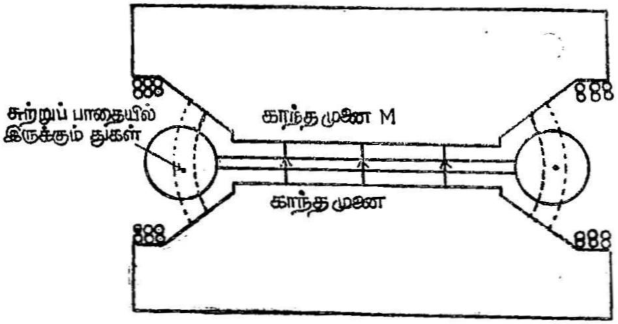
$$= 18 \text{ மீட்டர்கள்}$$

7·8 பீட்டாட்ரான் அல்லது பீட்டா சிங்ரோட்ரான் (Betatron or Beta-Synchrotron)

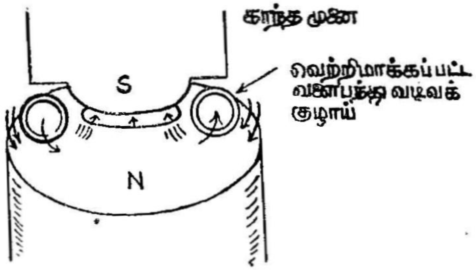
எலக்ட்ரான்களை முடுக்குவதற்குச் சைக்ளோட்ரான் பயன்பட வில்லை. ஏனெனில், எலக்ட்ரானின் அமைதிநிலை நிறை மிகச் சிறியதாக இருப்பதால், குறைந்த ஆற்றல்களுக்கே அதன் நிறை அதன் அமைதிநிலை நிறையைப் போன்று மூன்று மடங்கிற்கு மேலாகிவிடுகின்றது. அதனால், எலக்ட்ரான்கள் மற்றொரு முறையினால் முடுக்கிவிடப்படுகின்றன. இம் முறையில் எலக்ட்

ரான்கள் மாறுகின்ற காந்தப்புலத்திற்குப் படுத்தப்படுகின்றன. பீட்டாட்ரான் என்றழைக்கப்படும் இப் பொறியில் எலக்ட்ரான்கள் வளைபந்து வடிவமுள்ள (doughnut shaped) ஒரு குழாயில் செலுத்தப்பட்டுப் படம் 7·7-ல் காட்டியவாறு அமைக்கப்பட்டுள்ள M என்ற ஒரு காந்தத்தின் இருமுனைகளுக்கிடையே வைக்கப் படடுள்ளன. இந்த அமைப்பு முதன்முதலாக 1940ஆம் ஆண்டு கெர்ஸ்ட் (Kerst) என்பவரால் எலக்ட்ரான்களை முடுக்குவதற்காக நிறுவப்பட்டது.

பீட்டாட்ரான் வேலை செய்யும் தத்துவம் மின்னழுத்த மாற்றி ஒன்றின் தத்துவத்தை ஒட்டியே அமைக்கப்பட்டுள்ளது எனலாம். மின்னழுத்த மாற்றி ஒன்றிலுள்ள முதற் சுருளில் மாறுதிசை மின்னோட்டம் பாயும்பொழுது அதைச் சுற்றியுள்ள இடைவெளியில் மாறும் காந்தப்புலத்தை உண்டாக்குகின்றது; இந்தக் காந்தப் புலத்தில் ஏற்படும் மாற்றங்களை ஒட்டித்தான் துணைச்சுருளில் ஒரு மாறுதிசை மின்னோட்டத்தைத் தோற்றுவிக்கிறது. அதாவது

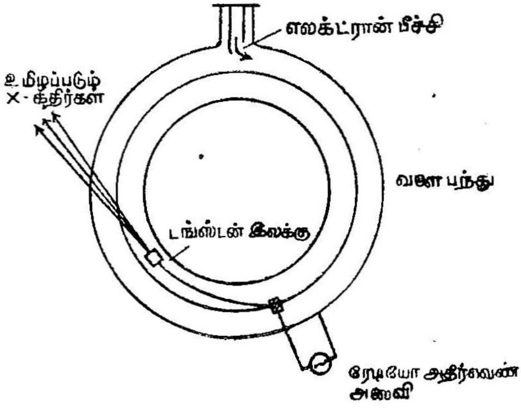


படம் 7·7 (அ)



படம் 7·7 (அ)

அலைவுறும் எலக்ட்ரான் பாயம் ஒன்றைத் துணைச்சுருளில் உண்டாக்குகிறது. பீட்டாட்ரானில் உள்ள துணைச்சுருள் வெற்றிடமாக்கப்பட்ட கண்ணாடியினாலோ அல்லது பீங்கானாலேயோ வளை பந்து வடிவத்தில் செய்யப்பட்டிருக்கிறது. *WW* என்ற சுருள் வழியாகப் பாயும் மின்துடிப்பினால்தான் காந்தம் செயல்பட ஆரம்பிக்கிறது. சூடேற்றப்பட்ட உலோக இழையிலிருந்து எலக்ட்ரான்கள் உமிழப்பட்டு 20 முதல் 70 கிலோ வோல்ட்டு மின் அழுத்தத்தினால் முதலாவதாக முடுக்கப்படுகின்றன. பிறகு, ஒரு குறிப்பிட்ட அளவுக்கு மாறுகாந்தத்தினால் உண்டாகும் காந்தப் பாயம் மாறுவதால் ஏற்படும் தூண்டல் மின்விசையினால் இந்த எலக்ட்ரான்கள் மறுபடியும் முடுக்கம் பெறுகின்றன. பீட்டாட்ரானின் ஒரு முக்கிய குணம் யாதெனில், இதனால்



படம் 7·7 (ஆ)
பீட்டாட்ரான் வேலை செய்யும் விதம்

முடுக்கப்பெறும் எலக்ட்ரான்களின் தொடக்க ஆற்றலுக்கும் இறுதி ஆற்றலுக்குமிடையே மிகுந்த வேறுபாடு உள்ளபோதிலும் அவற்றின் சுற்றுப்பாதை மாறாது இருப்பதேயாகும். வேண்டுமளவிற்கு எலக்ட்ரான்கள் முடுக்கப்பட்டபின் மற்றொரு துணைச்சுருளின் வழியாகப் பாயும் மின்னோட்டத்தின் உதவி கொண்டு தங்கள் பாதைகளினின்றும் விலக்கமடைகின்றன. இந்த எலக்ட்ரான்கள் செயலீடுகள் நிகழ்த்துவதற்குத் தயாராக உள்ளன.

மேற்கண்ட பொறிகளில் வட்டப்பாதைகளில் முடுக்கப் பெறும் எலக்ட்ரான்கள் கதிரியக்கத்தினால் மின்காந்த அலைகளை உமிழ்கின்றன. இத்தகைய கதிரியக்கத்தினால் ஏற்படும் ஆற்றல் இழப்புகள் அதிகமாக இல்லை எனலாம்.

வினாக்கள்

1. வான்டிகிராப் மின்னியற்றி ஒன்றின் படம் வரைந்து அது வேலை செய்யும் தத்துவத்தை விளக்குக. அதன் பயன்கள் சிலவற்றைக் கூறுக.

2. விதரோவின் 'நேரியல் துகள் முடுக்கி' எத் தத்துவத்தைக் கொண்டு வேலை செய்கிறது? அவ் வெந்திரத்தின் குறைபாடுகள் யாவை?

3. சைக்ளோட்ரானின் படம் வரைந்து அதன் பாகங்களை விவரி. அது எத் தத்துவத்தின் அடிப்படையில் இயங்குகிறது? சைக்ளோட்ரானை அது கண்டுபிடிப்பதற்குமுன் நிறுவப்பட்ட துகள் முடுக்கிகளோடு ஒப்பிடுக.

4. உனக்குத் தெரிந்த வட்டப்பாதை முடுக்கிகளில் சில வேலைசெய்கிற விதத்தை எழுதி அவற்றின் சார்புக் குணங்களை விளக்குக.

5. புரோட்டான்களை முடுக்குவதற்காக நிறுவப்பட்ட ஒரு சைக்ளோட்ரானின் காந்தப் பாயத்தின் அடர்த்தி 14,000 கவுஸ் என்றால் D வளைவுகளின்மீது செயல்படும் மாறுதிசை மின்புலத்தை எவ்வளவு விரைவில் மாற்ற வேண்டும்?

   $Mp = 1{\cdot}67 \times 10^{-24}\ gm$

   $e = 1{\cdot}6 \times 10^{-20}$ மின்காந்த அலகுகள்.

6. ஒரு சைக்ளோட்ரானைச் சிங்ரோ சைக்ளோட்ரானுடன் ஒப்பிடுக. சிங்ரோ சைக்ளோட்ரானின் படம் வரைந்து அது வேலை செய்யும் விதத்தை விளக்கு.

7. ஒரு பீட்டாட்ரான் படம் வரைந்து அது வேலை செய்யும் விதத்தை விளக்கு. எம் முறையில் அது சைக்ளோட்ரானிடமிருந்து மாறுபட்டிருக்கிறது?

8. அணுக்கருச் செயலீடுகளும் செயற்கைக் கதிரியக்கமும்

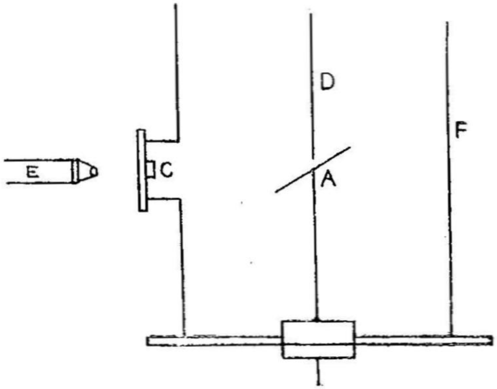
8·1. முன்னுரை

அணுக்கரு இயற்பியலில், கருவிலுள்ள துகள்களைப் பிணைக்கும் விசைகளின் பண்புகளைப் பற்றித்தான் நாம் ஆராய்கிறோம். கருவிசையைப்பற்றி அறிய நமக்கு இரு முறைகள் உள்ளன. ஒன்று இயற்கையில் கிடைக்கக்கூடிய, உறுதிநிலையிலுள்ள பல கருக்களின் பண்புகளைத் தொகுத்து அறிவதன்மூலம் கருவிசையின் பண்புகளை நாம் அறியலாம். மற்றொரு முறையில், அதிகத் திசைவேகங்களைக் கொண்ட சில துகள்களைச், சில கருக்களின்மீது மோதவிட்டுக், கருவைச் சிதைவுறச் செய்து அதினின்றும் கருவிசையின் பண்புகளை அறியலாம். இச் செயலீடுகளை நிகழ்த்துவதற்குத் தேவைப்படும் அதிகத் திசைவேகமுடைய துகள்கள் வெவ்வேறு துகள் முடுக்கிகளினின்றும் கிடைக்கின்றன என்று நாம் முன்புப் பார்த்தோம்.

8·2. காக்ராப்ட்-வால்டன் சோதனை

முதல் அணுக்கருச் சிதைவு இங்கிலாந்திலுள்ள காவெண்டிஷ் சோதனைச் சாலையில் சாக்ராப்ட், வால்டன், என்ற இரண்டு விஞ்ஞானிகளால் நிகழ்த்தப்பட்டது. அவர்கள் நிலைமின் துகள் முடுக்கியிலிருந்து (electrostatic accelerator) 600 கி. எ. வோ. ஆற்றல் பெற்ற புரோட்டான்களைக் கொண்டு லிதியம் (Lithium) கருவோடு மோதச் செய்து, அக் கருவைச் சிதைவுறச் செய்தார்கள். அவர்கள் பயன்படுத்திய ஆய்கருவி படம் 8·1-ல் காட்டப்பட்டிருக்கின்றது.

துகள் முடுக்கியின்றும் கிடைக்கின்ற D என்ற புரோட்டான் கற்றை A என்ற லிதியம் இலக்கைத் தாக்குகிறது. F என்பது வெற்றிடமாக்கப்பட்ட நிலைமின் முடுக்கியின் குழாய். புரோட்டான் கற்றைக்குச் செங்குத்தாகக் கிடைக்கும் துகள்கள் B என்ற துத்தநாகச் சல்பைடு திரையின்மீது படுகின்றபொழுது ஒளிர்வு (glow) உண்டாகின்றது. இந்த ஒளிர்வை E என்ற



படம்- 8·1.
லிதியம் கருவுடன் புரோட்டான் மோதுகின்றபொழுது கிடைக்கும் α துகளைக் கண்டுபிடிக்க காக்ராப்ட்-வால்டன் நிகழ்த்திய சோதனை

நுண்ணோக்கி மூலம் காணலாம். லிதியம் இலக்கிலிருந்து புரோட்டான்களும் சிதறி *B*-யை அடையக்கூடுமாதலால், அவற்றைத் தடுப்பதற்கு '*C*' என்ற மைக்காத் தகடு படத்தில் காட்டியவாறு பொருத்தப்பட்டிருக்கிறது. ஏறத்தாழ 125-லிருந்து 600 கி. வோ. ஆற்றல் படைத்த துகள்களே துகள் முடுக்கியினின்றும் கிடைக்குமாறு செய்யப்பட்டுள்ளது.

125 கி. எ. வோல்ட்டுக்கும் அதிகமான ஆற்றல் பெற்ற புரோட்டான்கள் திசையின்மேல் படும்போது ஏற்பட்ட ஒளிர்வு புரோட்டான் கற்றை மின்னூட்டத்திற்கு நேர்விகிதத்தில் இருந்தது. ஈர்ப்பின் வலிமையை இரு விஞ்ஞானிகளும் அதிகமாக்கிக், கருச்சிதைவிலிருந்து கிடைத்த விளைபொருள்களின் நெடுக்கத்தை அளந்தனர். முடுக்க மின்னழுத்தம் 100 முதல் 200 கி. வோ. வரை இருக்கும்பொழுது இந்த நெடுக்கமானது ஏறத்தாழ மாறிலியாக இருந்தது என்று அவர்கள் கண்டனர்.

துத்தநாகச் சல்பைடு திரையை மாற்றி, அங்கு ஒரு சிறிய துளை செய்து, அதன் வழியாக வந்த துகள்களை, வில்சனின் மேகக் கலத்தினுள் செலுத்தித் துகள்களின் பாதைகளைப் புகைப்படம் எடுத்தனர். இன்னுமொரு முறையில் அயனிக்கலம் பயன்படுத்தப்பட்டு, இலக்கிற்கும் கண்டுபிடிக்கும் சாதனத்திற்கும் இடையில் உட்கவரும் பொருள்களைக் கொண்டு வெளிவரும் துகள்களின் நெடுக்கங்கள் கண்டுபிடிக்கப்பட்டன. இந்த நெடுக்கங்கள்

பொலோனியத்திலிருந்து கிடைக்கும் α துகளின் நெடுக்கங்களோடு ஒப்பிடப்பட்டபொழுது இரண்டும் சமமாக இருப்பது கண்டுபிடிக்கப்பட்டது. இந்த முடிவும், இந்தத் துகள்கள் விளைவிக்கும் சீரான அயனியாக்கமும்,முடுக்க மின்னழுத்தத்தைச்சார்ந்திராததுமான உண்மையையும், இத் துகள் புரோட்டான்களாக இருக்க முடியாதென்பதைத் தெளிவாக்கின.

இச் செயலீட்டிலிருந்து கிடைக்கும் துகள்கள் α துகள்களாகத்தான் இருக்க வேண்டும் என்று காக்ராப்ட்டும் வால்டனும் முடிவுசெய்தனர்.

$$3Li^7 + {}_1H^1 \longrightarrow 2He^4 + 2He^4 \qquad \dots (8{\cdot}1)$$

இச்செயலீட்டில் ஒரு சிதைவுக்கு இரண்டு α துகள்கள் கிடைக்கின்றன எனக் காண்கின்றோம். ஆனால், காக்ராப்ட்டும் வால்டனும் α துகள்கள் தனித்தனியாக வெளிவருவதையே கண்டனர். நேர்க்கோட்டு உந்தம் இச் செயலீட்டில் மாறாது இருக்க வேண்டுமானால், இரண்டு α துகள்களும் சமமான ஆற்றலைக் கொண்டு நேர் எதிர்த்திசைகளில் செல்லவேண்டுமென்று கண்டார்கள். எனவேதான் இரண்டு α துகள்களை அவர்கள் காண்பதற்குப் பதிலாக ஒரே ஒரு α துகளை மட்டுமே கண்டனர்.

மேற்கண்ட செயலீட்டில் அதிக அளவு ஆற்றல் வெளிவருகிறது எனக் கண்டறியப்பட்டது.

Li^7 (லிதியம்) கருவின் நிறை	=	7·01	அ. நி. அ.
புரோட்டானின் நிறை	=	1·007825	,,
மொத்தம்	=	8·023830	,,
2 α-துகள்களின் நிறை	=	8·005208	,,
இவற்றிற்கிடையேயுள்ள நிறை வேறுபாடு	=	0·018622	,,

ஐன்ஸ்டீனின் நிறை-ஆற்றல் சமன்பாட்டின்படி இந் நிறை மிகைவு 17·35 மி. எ. வோ. ஆற்றலுக்குச் சமமாகும். இவ் வாற்றல் செயலீட்டு விளைப் பொருள்களின் இயக்க ஆற்றலாக அமைகிறது.

காக்ராப்ட், வால்டன் இச் செயலீட்டில் உமிழப்பட்ட α துகள்களின் இயக்கவாற்றலை 8·6 மி. எ. வோ. என்று சோதனைமூலம் கண்டறிந்தனர். எனவே, ஒரு செயலீட்டில் வெளியிடப்படும் மொத்த ஆற்றல் $2 \times 8{\cdot}6 = 17{\cdot}2$ மி. எ. வோ. என்று கணக்கிடப்பட்டது. இது கணக்கீட்டின்படி எதிர்பார்க்கப்பட்ட ஆற்றலுக்கு

ஏறத்தாழச் சமமாக இருந்ததனால் காக்ராப்ட்டும் வால்டனும் தாம் ஊகித்த செயலீட்டின் நிகழ்ச்சி சரியென முடிவுசெய்தார்கள்.

இச் செயலீடுதான் முதன்முதலில் முடுக்கப்பெற்ற துகள்களால் செயற்கை முறையில் நிகழ்த்தப்பட்டது. இதனால், இது ஒரு முக்கியமான சோதனையாகும். தவிரவும், ஐன்ஸ்டீனின் நிறை-ஆற்றல் சமன்பாட்டின் உண்மையை முதன்முதலாக இச் சோதனை தான் விளங்கியது எனலாம்.

8·3 அணுக்கரு அமைப்பும், அழிவின்மைக் கோட்பாடுகளும்

அ. நி. எ. A கொண்ட அணுக்கருவில் Z புரோட்டான்களும் $(A-Z)$ நியூட்ரான்களும் அணுக்கரு விசையினால் பிணைவுற்றிருக்கின்றன என்று பார்த்தோம். புரோட்டான்களையும் நியூட்ரான்களையும் "நியூக்லியான்கள்" (Nucleons) என்றழைத்தோமானால், கருவில் A நியூக்லியான்கள் உள்ளன என்பது பெறப்படுகின்றது. இதன் அடிப்படையில், அணுக்கருச் செயலீடுகளுக்கான நன்கு முக்கியத்துவம் வாய்ந்த "அழிவின்மை விதிகளை" (conservation laws) நாம் பெறலாம்.

(i) நிறை-ஆற்றல் அழிவின்மை விதி

முதலாவதாக எல்லா அணுக்கருச் செயலீடுகளிலும் நிறை-ஆற்றல் மாறாதிருக்கின்றது எனலாம். இது காக்ராப்ட்-வால்டன் சோதனையில் ஓரளவிற்கு உண்மையாக்கப்பட்டது. ஒரு செயலீட்டில் நிறையோ அல்லது ஆற்றலோ மாறினால் அஃது $E=mc^2$ என்ற ஐன்ஸ்டீனின் சமன்பாட்டின்படி ஒன்றிற்கொன்று நிரம்பி விடுகின்றது.

(ii) உந்தத்தின் அழிவின்மை விதி

எல்லாச் செயலீடுகளிலும் மொத்த உந்தம் மாறாது உள்ளது. செயலீடுகளில் பங்கு கொள்கிற கருக்கள், துகள் ஆகியவற்றின் செயலீடு நிகழ்வதற்குமுன் உள்ள உந்தமும் செயலீட்டிற்குப்பின் அவற்றின் உந்தமும் சமமென இது வலியுறுத்துகிறது.

(iii) மின்னூட்டத்தின் அழிவின்மை விதி

எல்லா அணுக்கருச் செயலீடுகளிலும் பங்கு கொள்கின்ற கருக்கள், துகள்கள் ஆகியவற்றின் மொத்த மின்னூட்டம் மாறுவதில்லை. செயலீட்டின் முன்னர் இருக்கும் கரு-துகள்களின் மின்னூட்டம் செயலீட்டிற்குப்பின் இருக்கும் கருத்துகள்களின் மின்னூட்டத்திற்குச் சமமாகும் என்பதை இவ் விதி வலியுறுத்து

கின்றது. இதிலிருந்து மின்னூட்டம் செயலீட்டின்மூலம் அழிவதில்லை என்பது பெறப்படுகின்றது.

(iv) நியூக்ளியான்களின் அழிவின்மை

கருக்கள் நியூக்ளியான்களால் ஆனவையாகையால், ஓர் அணுக்கருச் செயலீட்டில் பங்குபெறும் மொத்த நியூக்ளியான்களின் எண்ணிக்கை மாறுவதில்லை எனலாம்.

8·4. அணுக்கருச் செயலீட்டின் Q மதிப்பு

A, B, C, D என்ற கருக்கள் பங்குபெறும் ஓர் அணுக்கருச் செயலீட்டில் நிறை-ஆற்றல் மாருது இருப்பதால்,

$$A+B \longrightarrow C+D+Q$$

என்று எழுதலாம். A, B ஆகியவற்றின் மொத்த நிறை C,D ஆகியவற்றின் மொத்த நிறையைவிட அதிகமாக இருப்பின், நிறை–ஆற்றல் அழியாக் கோட்பாட்டின்படி, இந் நிறை வேறுபாட்டிற்குச் சமமான Q என்ற ஆற்றல் செயலீட்டில் வெளியிடப்படுகின்றது எனலாம். காட்டாக,

$$_3Li^7+{}_1H^1 \longrightarrow {}_2He^4+{}_2He^4+Q$$

என்ற சமன்பாட்டை எடுத்துக்கொள்வோம். இச் செயலீட்டின் Q மதிப்பு 17·35 மி. எ. வோ. என்று முன்னரே கண்டோம். ஒரு கருச்செயலீட்டின் Q மதிப்பு நேர்க்குறி உடையதாகவோ அல்லது எதிர்க் குறி உடையதாகவோ இருக்கலாம். Q மதிப்பு நேர்க்குறி உடைய செயலீடுகளிலிருந்து ஆற்றல் வெளியிடப்படுகின்றது. இவ் வகைச் செயலீடுகள் எறி துகளின் ஆற்றல் உட்கவர்ச்சி இல்லாமலேயே நிகழக்கூடும். இவற்றை 'ஆற்றல் வெளியிடும் செயலீடுகள்' (exoergic reaction) என்று கொள்ளலாம். இச் செயலீடுகளில் வெளியிடப்படும் ஆற்றல், உட்கவரப்படும் எறிபொருளின் இயக்க ஆற்றலோடு சேர்ந்து செயலீட்டு விளைபொருள்களின் இயக்க ஆற்றலாக மாறுகின்றது. காக்ராப்ட்-வால்டன் சோதனையை ஒரு 'ஆற்றல் வெளியிடும்' செயலீடாகக் கொள்ளலாம்.

ஒரு செயலீட்டில் Q மதிப்பு எதிர்க்குறி உடையதாக இருந்தால், செயலீட்டின் வலப்பக்கத்தில் உள்ள கரு, துகள் ஆகியவற்றின் மொத்த நிறை அதன் இடப்பக்கத்திலிருக்கும் கரு, துகள் ஆகியவற்றின் மொத்த நிறைக்குக் குறைவாகவே இருக்கும். எனவே, இத்தகைய செயலீடுகளை நிகழ்த்த வெளியின்றும் ஒரு குறிப்பிட்ட அளவு ஆற்றல் கருவிற்குக் கொடுக்கப்படவேண்டும்.

இவ்வாற்றல் செயலீட்டு எறிபொருளின் இயக்க ஆற்றலாகவும் இருக்கலாம். இச் செயலீடுகள், ஆற்றல் உட்கவர் செயலீடுகள்' (endoergic reaction) என அழைக்கப்படுகின்றன. உட்கவரும் ஆற்றல் 'பயன் தொடக்க ஆற்றல்' (threshold energy) என அழைக்கப்படுகின்றது, இந்த அளவு ஆற்றல் எறிதுகளின் ஆற்றலாகவோ, அல்லது உட்கவரப்படும் போடான் (photon) களின் மின் சார்ந்த ஆற்றலாகவோ இருக்கலாம். எப்படி இருப்பினும் கருவிற்குக் கொடுக்கப்பட்டால்தான் கருச்செயலீடு நிகழ முடியும்.

அணுக்கருச் செயலீடுகளில் γ கதிர்கள் உமிழப்பட்டால் அவற்றிற்கான 'Q மதிப்பை' மாற்றி வரையறுக்க வேண்டும். ஒரு மாதிரிச்செயலீட்டைக் கீழே காண்க.

$$A+B \longrightarrow C+D+\gamma+Q.$$

இந்தச் செயலீட்டில் A, B கருக்களின் மொத்த நிறை γ கதிரின் இயக்கவாற்றலுக்கும், C, D ஆகியவற்றின் மொத்த நிறைக்கும் இடையேயுள்ள வேறுபாடே Q மதிப்பு ஆகும்.

செயலீடுகளின் Q மதிப்பைக் கணக்கிடச், செயலீடுகளில் பங்கு பெறும் கரு, துகள்களின் நிறை ஒரே வகை அலகுகளிலே இருத்தல் வேண்டும். இவை அ. நி. அலகுகளிலாவது அல்லது மி. எ. வோல்ட்டுகளிலாவது இருக்கலாம். நடைமுறையில் பெரும்பாலும் பங்கு கொள்ளும் கருநிறைக்குப் பதிலாக, அவை கொண்ட அணு நிறைகளே பயன்படுத்தப்படுகின்றன.

மாதிரிக் கணக்கு 8·1

கீழ்க்கண்ட அணுக்கருச் செயலீட்டின் 'பயன் தொடக்க ஆற்றலைக்' கணக்கிடுக.

$${}_{90}Th^{232} + {}_{2}He^{4} \longrightarrow {}_{92}U^{235} + On$$

நியூட்ரானின் நிறை	=	1·0090	அ. நி. அ.
$_2He^4$-ன் நிறை	=	4·0038	,,
$_{90}Th^{232}$-ன் நிறை	=	232·1105	,,
$_{92}U^{235}$-ன் நிறை	=	235·1172	,,

$$Q = 931\ [\ (M_{Th} + M_{He}) = (Mu+Mn)\ ]$$
$$= 931\ [\ 236{\cdot}1143\ -\ 236{\cdot}1262\ ]$$
$$= 931\ [\ -0{\cdot}0119\ ] = -\ 11{\cdot}1 \text{ மி. எ. வோ.}$$

Q மதிப்பின் எதிர்க்குறி ஓர் ஆற்றல் உட்கவர் செயலீடு இது என்பதைக் குறிக்கிறது. இதை Th^{232} (α, n) U^{235} செயலீட்டின் பயன் தொடக்க ஆற்றல் எனலாம்.

8·5. அணுக்கருச் செயலீட்டின் கோட்பாடு

எவ்வாறு வேதியற் செயலீடுகளில் அணுக்கள் பரிமாறிக் கொள்ளப்படுகின்றனவோ, அவ்வாறு அணுக்கருச் செயலீடுகளில் கருத் துகள்கள் பரிமாற்றம் செய்யப்படுகின்றன் வேதியற் செயலீடுகளுக்கும் கருச் செயலீடுகளுக்கும் உள்ள முக்கிய வேறுபாடு அவற்றின் ஆற்றல்களைப் பொறுத்ததே. கருச் செயலீடுகளில் ஏற்கப்படும் அல்லது வெளியிடப்படும் ஆற்றல் வேதியற் செயலீடுகளில் பரிமாற்றம் செய்யப்படும் ஆற்றலைவிட மிக அதிக அளவு உள்ளது. அணுக்கருச் செயலீடுகளை நிகழ்த்தவல்ல துகள்கள், நியூட்ரான்கள், புரோட்டான்கள், α-துகள்கள், ஃபோட்டான்கள் ஆகியவைகளாகும். இவற்றில் நியூட்ரானும் ஃபோட்டானும் (Photon) மற்றத் துகள்களைவிட வல்லமை சிறிது குறைந்தவை எனலாம். ஏனெனில் அவை மின்னூட்டம் அற்றவையாக இருப்பதால் இலக்குக் கருவினுள்ளே ஒருவித எதிர்ப்பும் இல்லாமல் செல்லக்கூடும். ஆனால், மற்ற மின்னூட்டம் பெற்ற துகள்கள் அத் துகள்களுக்கும் கருவிற்கும் இடையேயுள்ள கூலூம்(Coulomb)விலக்கு விசையைத் தவிர்த்தால்தான் உள்ளே சென்று செயலீடு நிகழ்த்த முடியும்.

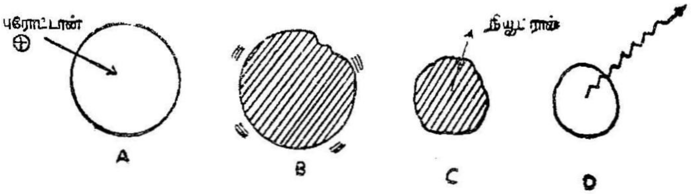
*1936*ஆம் ஆண்டு நீல்ஸ் போர் (Niels Bohr) என்ற விஞ்ஞானி அணுக்கருச் செயலீடுகளை விளக்க ஒரு கோட்பாட்டினை வரையறுத்தார். அதன்படி ஓர் அணுக்கருச் செயலீடானது படிப்படியாக இரண்டு நிலைகளில் நிகழ்கின்றது எனப்படுகின்றது. முதலில் கருவின்மீது ஏவப்படும் துகளானது இலக்குக் கருவினுல் உட்கவரப்பட்டு ஒரு முழுக் 'கூட்டுக் கருவாக' (compound nucleus) மாறுகின்றது. இக் கூட்டுக்கரு பிறந்த பின் காலப்போக்கில் புரோட்டான், நியூட்ரான் என்றவற்றில் ஏதாவது ஒரு வினைப்பொருளை உமிழ்ந்து, இறுதியில் விளைகருவாக (product nucleus) மாறுகின்றது. மற்றும் கூட்டுக்கரு சிதைவுறுகின்ற வழி அது எவ்வாறு உண்டாகியது என்பதைப் பொறுத்ததன்று. கருச்சிதைவு கூட்டுக்கருவின் பண்புகளைப் பொறுத்ததேயன்றி, மற்ற எதையும் பொறுத்ததன்று.

செயலீடு நிகழும் இரண்டு நிலைகளைக் கீழ்க்கண்டவாறு கொள்ளலாம்:

1. கருவின்மீது ஏவப்படும் துகள் + இலக்குக்கரு → கூட்டுக்கரு.

2. கூட்டுக்கரு —> விளைகரு + வெளியேறும் துகள்கள்.

கூட்டுக்கரு உறுதி நிலையில் இருக்கவேண்டிய அவசியமில்லை. இரண்டாம் நிலையில் ஏற்படும் நிகழ்ச்சி, கூட்டுக்கரு அதிக ஆற்றல் பெற்றும், உறுதியற்ற நிலையிலும் இருக்கிறது என்பதை வலியுறுத்துகின்றது. கூட்டுக்கரு உண்டாவதையும் சிதைவுறுவதையும் கீழ்க்கண்ட படத்தில் காணலாம்.



படம் 8·2
செயலூக்கம் கொண்ட கூட்டுக் கருவின் உற்பத்தி, அது சிதைவுறும் விதம் ஆகியவற்றை விளக்கும் படம்

A—இலக்குக் கரு
B—கூட்டுக் கரு (செயலூக்கம் பெற்றது)
C—கூட்டுக்கரு சிதைவுறுதல்
D—விளைக் கரு

நீல்ஸ் போர், கருவின் திரவத்துளி மாதிரியான அமைப்பினின்றும் கருச் செயலீடுகளுக்கு விளக்கம் தந்தார். கூட்டுக் கரு சிதைவுறுவது, திரவத்துளி ஒன்றிலிருந்து மூலக் கூறுனது ஆவியாதல் போன்றுள்ளது என்று அவர் கூறினர். இதிலிருந்து ஒரு கூட்டுக்கரு சிதைவுறும்போது எவ் வகைத் துகள்கள் வெளிவரக்கூடும், எவ் வகைக் கரு விளைகருவாக அமையும் என்பனவற்றைக் கூற முடியாது. என்ன நடக்கும் என்பதைப் புள்ளியியல் விதிகளால்தான் (statistical laws) அறியமுடியும். இது ஒரு விதத்தில் சில கருக்களில் ஏற்படும் இயற்கைக் கதிரியக்கத்திற்கு இணையாக உள்ளது எனலாம்.

கொடுக்கப்பட்ட இலக்குக் கரு ஒன்றை ஒரே விதமான துகள்கள் தாக்கும்போதுகூட வெவ்வேறு விளைபொருள்கள் ஏற்படலாம். எடுத்துக்காட்டாக, Al^{27} கருவைப் புரோட்டான்கள் தாக்குகின்றபொழுது கீழ்க்கண்ட செயலீடுகளில் ஏதாவதொன்று நிகழலாம்.

$$
{}_{13}Al^{27} + {}_{1}H^{1} \longrightarrow [{}_{14}Si^{28}] \longrightarrow \left.\begin{array}{l} {}_{14}Si^{28} + \gamma \\ \longrightarrow {}_{13}Al^{27} + {}_{1}H^{1} \\ \longrightarrow {}_{13}Al^{27} + {}_{1}H^{2} \\ \longrightarrow {}_{12}Mg^{24} + {}_{2}He^{4} \\ \longrightarrow {}_{14}Si^{27} + {}_{0}n^{1} \end{array}\right\} \dots \quad (8{\cdot}2)
$$

எனவே, கருச்செயலீடு ஒன்றில் கூட்டுக்கரு பிறந்தவுடனே அது வெவ்வேறு வழிகளில் சிதைவுறக் கூடுமெனவும், ஏதாவது ஒரு நிகழ்ச்சியின் நிகழ்திறன் மற்ற நிகழ்ச்சிகளின் நிகழ்திறன்களை விட அதிகமாக இருக்கக்கூடும் எனவும் அறியலாம். சிதைவுறும் வழி அழிவின்மை விதிகளை ஒட்டி இருத்தல் வேண்டும்.

8·6. அணுக்கருச் செயலீட்டின் வகைகள்

(i) α-கதிர்கள் மோதுவதால் ஏற்படும் கருச் செயலீடுகள் ருதர்போர்டின் சோதனை — புரோட்டானின் கண்டுபிடிப்பு.

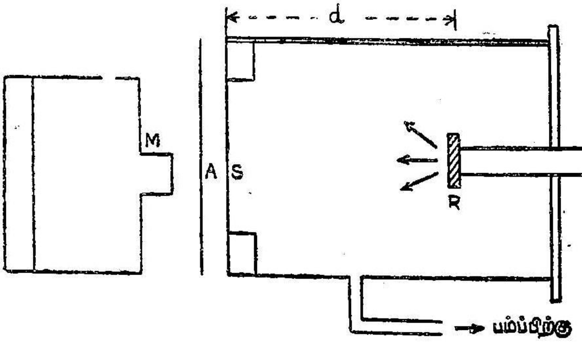
ரேடான்-B (Radon-B) அல்லது ரேடான்-C (Radon-C) கருவிலிருந்து கதிரியக்கத்தின் மூலம் வெளிவரும α-துகள்களைக் கொண்டு நைட்ரஜன் கருவைத் தாக்கியபொழுது, ஒரு வகைத் துகள்கள் உண்டாவதை 1919 ஆம் ஆண்டு 'ருதர்போர்டு' கண்டறிந்தார். ஏறத்தாழ 40 செ.மீ. தொலைவிலுள்ள துத்தநாக சல்பைடு திரையொன்றில் இவை ஒளிர்வை (glow) உண்டாக்கு கின்றன என்பதை அவர் கண்டறிந்தார். இத் துகள்கள் α-துகள்களாகவோ அல்லது எலக்ட்ரான்களாகவோ இருக்க முடியாது என நிரூபிக்கலாம். ஏனெனில் α-துகள்கள் 40 செ.மீ. தொலைவிலுள்ள திரையை அடையும் அளவிற்கு ஆற்றல் வாய்ந்தவை அல்ல. மேலும், எலக்ட்ரான்கள் நேரில் காணக்கூடிய ஒளிர்வை ஏற்படுத்துவதில்லை. இச் செயலீட்டிலிருந்து கிடைக்கும் துகள்களைக் காந்தப்புலம் கொண்டு வளையவைத்து அவற்றின் நிறையையும் மின்னேற்றத்தையும் கண்டுபிடித்தபொழுது இவை புரோட்டானின் நிறைக்கும் மின்னூட்டத்திற்கும் சமமாக இருந்ததால் விளையும் துகள்கள் புரோட்டான்களாகவே இருக்கவேண்டுமென்பது புலப்பட்டது. இச் செயலீட்டைக் கீழ்க்கண்ட சமன்பாடு விளங்குகிறது.

$$_7N^{14} + {_2He^4} + 12 \text{ மி. எ. வோ.} \longrightarrow {_8O^{17}} + {_1H^1}.$$

இச் செயலீட்டை N^{14} (α, p) O^{17} என்று சுருக்கியும் எழுதலாம். இச் செயலீட்டில் நைட்ரஜன் கருவானது புரோட்டானை வெளிவிட்டபின் ஆக்ஸிஜன் கருவாக மாறுகிறது எனக் கருதலாம். எனவே, முதன் முதலில் நடைபெற்ற செயற்கைத் தனிம மாற்றம் இதுதான் எனக் கூறுவது மிகையாகாது.

α-துகள், O^{17} கரு ஆகியவற்றின் பாதைகள் வில்ஸனின் மேகக்கலத்தைக்கொண்டு பார்க்கப்பட்டன. உறுதிநிலையிலுள்ள

ஓர் அணுக்கருவிலிருந்து உறுதிநிலையிலுள்ள மற்றோர் அணுக்கருவைச் செயற்கையாக உண்டாக்குவதைச் 'செயற்கைத் தனிம மாற்றம்' எனலாம்.



படம் 8·3.

செயற்கைக் கருச் சிதைவு — ருதர்போர்டின் சோதனை

M—நுண்ணோக்கி S—துத்தநாகசுந்தகடு திரை
R—இலக்கு A—ஜன்னல்

(அ) α-துகள் தூண்டும் அணுக்கருச் செயலீடுகள்: (α, p) செயலீடுகள்.

ருதர்போர்டும், சாட்விக்கும் போரானிலிருந்து (Boron) பொட்டாஸியம் வரை (கார்பன், ஆக்ஸிஜனைத் தவிர்த்து) உள்ள தனிமங்களோடு, α-துகள்கள் மோதுகின்றபொழுது அவை வேறு தனிமங்களாக மாறிப் புரோட்டான்களை வெளியிடுகின்றன எனக் கண்டனர். ஃப்ளூரின் α-துகளோடு மோதும்போது கீழ்க்கண்ட செயலீடு நிகழ்கிறது.

$$ {}_{9}F^{19} + {}_{2}He^{4} \longrightarrow {}_{10}Ne^{22} + {}_{1}H^{1} \quad \dots \quad (8{\cdot}3)$$

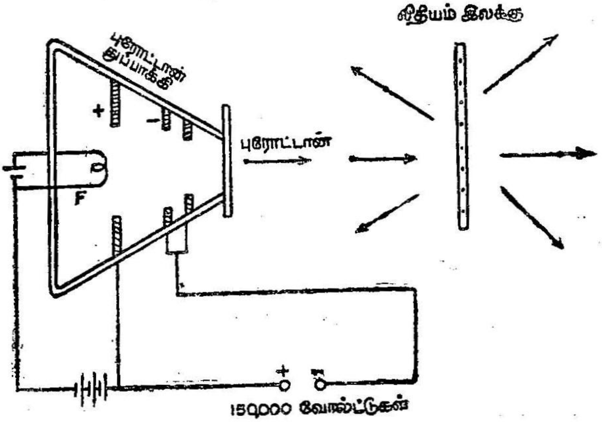
இதைப்போன்று வேறு பல செயலீடுகளும் நிகழ்கின்றன.

$$ {}_{11}Na^{23} + {}_{2}He^{4} \longrightarrow {}_{12}Mg^{26} + {}_{1}H^{1} \quad \dots \quad (8{\cdot}4)$$
$$ {}_{12}Mg^{24} + {}_{2}He^{4} \longrightarrow {}_{13}Al^{27} + {}_{1}H^{1} \quad \dots \quad (8{\cdot}5)$$
$$ {}_{13}Al^{27} + {}_{2}He^{4} \longrightarrow {}_{14}Si^{30} + {}_{1}H^{1} \quad \dots \quad (8{\cdot}6)$$

(ஆ) ஷேர் (Sher), பெயின் பிரிட்ஜ் என்ற இரு விஞ்ஞானிகள், முதன்முதலாக 1941ஆம் ஆண்டு பாதரசத்திலிருந்து தங்கத்தைச் செயற்கை முறையில் உண்டாக்கி ரசவாதம் செய்தவர்களின் கனவை நனவாக்கினர்.

$$ {}_{80}Hg^{200} + {}_{1}H^{1} \longrightarrow {}_{79}Au^{197} + {}_{2}He^{4} \quad \dots \quad (8{\cdot}7)$$

செயற்கை முறையில் தங்கம் கிடைத்தபோதிலும், இது கதிரியக்கமுடையதாகையால், பயனற்ற பொருளாகவே இருக்கிறது.



படம் 8·4

காக்ராஃப்ட் வால்டன் சோதனை—
லிதியம் கருவைத் தாக்கிக் கருச்சிதைவை உண்டாக்குதல்

(இ) **புரோட்டான் செயலீடுகள் :** (p—α) செயலீடுகள். இது காக்ராஃப்ட் வால்டன் நிகழ்த்திய சோதனையாகும். இச் சோதனையில் லிதியம் இலக்கு புரோட்டானல் தாக்கப்படுகின்றது. இதிலிருந்து இரண்டு α-துகள்கள் வெளிவருகின்றன. இது படம் 8·4-ல் காட்டப்பட்டுள்ளது.

புரோட்டான்கள், போரான் கருவோடு மோதுகின்றபொழுது மற்றுமொரு முக்கியச் செயலீடு நிகழ்கின்றது.

$${}_5B^{11} + {}_1H^1 \longrightarrow {}_4Be^8 + {}_2He^4 \longrightarrow 3\,{}_2He^4 \quad \ldots \quad (8{\cdot}8)$$

இச் செயலீட்டிலிருந்து கிடைக்கும் மூன்று α-துகள்களும் வெவ்வேறு நெடுக்கங்களைக் கொண்டிருக்கின்றன எனக் கண்டுபிடிக்கப்பட்டுள்ளது.

(ஈ) **டியூட்ரான் செயலீடுகள் :** α-துகள்கள், புரோட்டான்களைப் போலவே, அதிகத் திசைவேகம் கொண்ட டியூட்ரான்களும் கருக்களோடு மோதுகின்றபோது கருச் செயலீடுகள் நிகழ்கின்றன. டியூட்ரான்கள் மின்னூட்டமுடைய துகள்களாக இருப்பதால், துகள் முடுக்கிகளால்

அதிசத் திசைவேகமுடைய துகள்களாக ஆக்கப்படுகின்றன. செயலீடுகளில் இவை கருவிற்கு அருகாமையில் செல்லும் பொழுது புரோட்டான் நியூட்ரான்களாகச் சிதைவுறுகின்றன. இந்த இரண்டு வகைத் துகள்களின் கூட்டுவிசையினால் கருக்கள் சிதைவுறுகின்றன. டியூட்ரானைக் கொண்டு லிதியம் கருவைத் தாக்கினால் நமக்கு α துகள்கள் கிடைக்கின்றன. எனவே, இவை (d, α) என்று அழைக்கப்படுகின்றன.

$${}_3Li^7 + {}_1D^2 \longrightarrow 2\,{}_2He^4 + {}_0n^1 \qquad \ldots \quad (8{\cdot}9)$$

நைட்ரஜன், மக்னீசியம் போன்ற அணுக்கருக்களை டியூட்ரான் தாக்குகின்றபொழுது முக்கியமான செயலீடுகள் நிகழ்கின்றன.

$${}_7N^{14} + {}_1D^2 \longrightarrow {}_6C^{12} + {}_2He^4$$

$${}_{12}Mg^{24} + {}_1D^2 \longrightarrow {}_{11}Na^{22} + {}_2He^4$$

(உ) நியூட்ரான்களின் மோதலினால் ஏற்படும் செயலீடுகள்.

$(n-\alpha)$ செயலீடுகள்: பெரிலியம் அல்லது லிதியம் போன்ற இலேசான கருக்களோடு α-துகள்கள் மோதுகின்றபோது நியூட்ரான்கள் வெளிவருகின்றன என முன்னர்க் கண்டோம். நியூட்ரான்கள் மின்னூட்டமற்றவையாக இருப்பதால், இவை கருக்களினூடே இலேசாக ஊடுருவிச் செல்கின்றன எனவும் கண்டோம். எனவே, பல கருச் செயலீடுகள் நிகழ்வதற்கு நியூட்ரான்கள் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. 193?ஆம் ஆண்டு, ஃபெதர் (Feather) என்ற விஞ்ஞானி நைட்ரஜன் கருவோடு நியூட்ரான்களை மோதவிட்டு, நிகழ்ந்த கருச்சிதைவை மேகக் கலப் புகைப்படங்களைக் கொண்டு ஆராய்ந்தார். இவ்வாராய்ச்சிகளின் மூலம் கீழ்க்கண்ட செயலீடுகள் நிகழ்கின்றன என முடிவு செய்தார்.

$$\left.\begin{aligned} {}_7N^{14} + {}_0n^1 &\longrightarrow {}_6C^{14} + {}_1H^1 \\ {}_7N^{14} + {}_0n^1 &\longrightarrow {}_3Li^7 + 2\,{}_2He^4 \end{aligned}\right\} \qquad \ldots \quad (8{\cdot}10)$$

1934ஆம் ஆண்டு ஃபெர்மி (Enrico Fermi) என்ற அமெரிக்க விஞ்ஞானி அதிகத் திசைவேகமுடைய நியூட்ரான்கள், பாதரசம், காட்மியம், ரேடியம் போன்ற தனிமக் கருக்களோடு மோதுகின்றபோது ஏற்படுகின்ற செயலாக்கங்கள் நியூட்ரான்களின் வேகத்தைக் குறைத்தால் அதிகமாகின்றன என்று கண்டார். இது ஃபெர்மி விளைவு (Fermi effect) என்று அழைக்கப்படு

கின்றது. குறைந்த வேகம் கொண்ட நியூட்ரான்கள் மோதுவதனால் இலகுவாகக் கருச்சிதைவு ஏற்படுகின்றது. மேலும் நியூட்ரான் ஒரு மின்னேற்றமற்ற துகளாக இருப்பதால், கருவினுள் மிகு தொலைவு ஊடுருவிச் சென்று செயலீடுகளை நிகழ்த்துகின்றது என்று முன்னரே கூறினோம். குறைந்த வேகங்கள் கொண்ட நியூட்ரான்கள் நிகழ்த்தும் செயலீடுகளில் சில கீழே கொடுக்கப் பட்டிருக்கின்றன.

$${}_1H^1 + {}_0n^1 \longrightarrow {}_1H^2 + \gamma \text{ கதிர்கள்} \quad \ldots \quad (8{\cdot}11)$$

$${}_3Li^6 + {}_0n^1 \longrightarrow {}_2He^4 + {}_1H^3 \quad \ldots \quad (8{\cdot}12)$$

$${}_5B^{10} + {}_0n^1 \longrightarrow {}_3Li^7 + {}_2He^4 \quad \ldots \quad (8{\cdot}13)$$

$${}_7N^{14} + {}_0n^1 \longrightarrow {}_6C^{14} + {}_1H^1$$

இச் செயலீடுகளில் முதற் செயலீடு, நியூட்ரான் ஈர்ப்புச் செயலீடு ஆனதால் மிக முக்கியம் வாய்ந்த செயலீடாக இருக்கிறது.

(ஊ) ஃபோட்டான்கள் தூண்டும் செயலீடுகள் : γ-கதிர்களும் சில தனிமங்களின்மீது மோதி செயற்கைத் தனிம மாற்றங்களை உண்டாக்குகின்றன. எவ்வாறு ஒளி மின் விளைவில் ஃபோட்டான்கள் உலோகப் பரப்புகளின்மீது படும்போது எலக்ட்ரான்கள் வெளிவருகின்றனவோ அவ்வாறே ஃபோட்டான்கள் கருக்களின்மீது மோதுகின்றபொழுதும் அவை ஈர்க்கப்பட்டுக் கருச்செயலீடு ஒன்று நிகழ்கிறது. இச் செயலீட்டில் நியூட்ரான் போன்ற துகள்கள் உமிழப்படுகின்றன. 'ஒளிமின் விளைவு' ஏற்பட ஒரு 'பயன் தொடக்க அதிர்வெண்' இருப்பது போலக் கருவில் ஏற்படும் ஒளிமின் விளைவிற்கும் (Nuclear photo effect) ஒரு 'பயன் தொடக்க ஆற்றல்' உண்டு. இச் செயலீடுகளெல்லாம், ஆற்றல் உட்கவர் செயலீடுகளாகத் தான் இருக்க முடியும். ஒரு குறிப்பிட்ட ஆற்றலுடைய ஃபோட்டான்களை இலக்குக் கரு ஈர்த்துக்கொண்ட பிறகே, இச் செயலீடுகள் நிகழமுடியும்.

முதன்முதலில் இந்தப் 'போட்டோச் சிதைவுச் செயலீடு' (photo disintegration) *1930*ஆம் ஆண்டு *2 62* மி.எ.வோ. ஆற்றலுள்ள ஃபோட்டான்களைக் கொண்டு டியூட்ரான் கருவைத் தாக்கி, அதனைப் புரோட்டானாகவும் நியூட்ரானாகவும் சிதைவுறச் செய்தது.

$${}_1H^2 + \gamma \longrightarrow {}_1H^1 + {}_0n^1 + Q \quad \ldots \quad (8{\cdot}14)$$

இச் செயலீடு டியூட்ரானின் ஃபோட்டோச் சிதைவு (photo disintegration of Deutron) எனப்படுகின்றது.

மாதிரிக் கணக்கு

டியூட்ரான் கருவொன்றைப் புரோட்டான்-நியூட்ரான்களாகச் சிதைவுறச் செய்யும் γ-கதிர்களின் சிறும ஆற்றலைக் கீழே கொடுக்கப்பட்டுள்ள மதிப்புகளின்றும் கணக்கிடுக:

எலக்ட்ரானின் மின்னூட்டம்	e	$= 4.80 \times 10^{-10}$ நி.மி.அ.
எலக்ட்ரானின் நிறை	m	$= 0.91 \times 10^{-27}$ கிராம்.
ஒளியின் திசைவேகம்	c	$= 3.00 \times 10^{10}$ செ.மீ./வினடி
பிளாங்கின் மாறிலி	h	$= 6.55 \times 10^{-27}$ எர்கு வினடி
		$= 1.66 \times 10^{-24}$ கிராம்.
புரோட்டானின் நிறை		$= 1.00759$ அ. நி. அ.
நியூட்ரானின் நிறை		$= 1.00898$ அ. நி. அ.
டியூட்ரானின் நிறை		$= 2.01471$ அ. நி. அ.

$${}_1H^2 + \gamma \text{ கதிர்கள்} \longrightarrow {}_1H^1 + {}_0n^1.$$

எனவே, $2.01471 + E = 1.00759 + 1.00898$

இங்கு E என்பது γ-கதிர்களின் ஆற்றல்.

$$\therefore \quad E = \cdot 01471 - (1.00759 + 1.00898)$$
$$= 0.001816 \text{ அ. நி. அ.}$$
$$= 0.00186 \times 1.66 \times 10^{-24} \times (3.00 \times 10^{10})^2 \text{ எர்குகள்.}$$

V என்பது மின்னழுத்தமானல்

$$\text{ஆற்றல்} = \frac{eV}{300} \text{ எர்குகள்}$$

$$\therefore \quad \frac{eV}{300} = 0.00186 \times 1.66 \times 10^{-24} \times (3.00 \times 10^{10})^2$$

$$\therefore V = \frac{300 \times 0.00186 \times 1.66 \times 10^{-24} (3.00 \times 10^{10})^2}{4.80 \times 10^{-10}} \text{ எ. வோ.}$$
$$= 1.747 \times 10^6 \text{ எ. வோ.}$$
$$= 1.747 \text{ மி. எ. வோ.}$$

γ-கதிர்களால் தூண்டப்படும் செயலீடுகளுக்கு எடுத்துக்காட்டாக மற்ருெரு செயலீட்டையுங் கூறலாம்.

$${}_{15}P^{31} + \gamma \text{ கதிர்கள்}$$
$$\longrightarrow {}_{15}P^{30} + {}_0n^1$$
$$\downarrow$$
$${}_{14}Si^{30} + {}_1e^0 \text{ (பாசிட்ரான், Positron)}$$

இப்பொழுது பீட்டாட்ரான் (Betatron), சிங்ரோட்ரான் (Synchrotron), நேரியல் முடுக்கி (linear accelerators) ஆகியதுகள் முடுக்கிகளைக் கொண்டு பெருமளவிற்கு ஆற்றல் கொண்ட γ-கதிர்களைப் பெறமுடியுமாதலால், பெரும்பாலும் உறுதிநிலையிலுள்ள எல்லாக் கருக்களிலும் இந்தப் போட்டோ சிதைவுச் செயலீடுகளை நிகழ்த்தலாம். நடைமுறையில் $(\gamma\text{-}n)$, $(\gamma\text{-}p)$ செயலீடுகளே அதிகமாக உள்ளன.

8·7. அணுக்கருச் செயலீட்டின் நிகழ்திறன், முகப்பரப்பு

நியூட்ரானுக்கும் செயலீடு அடையும் கருவிற்கும் இடையே கூலும் விலக்கு விசை இல்லாததனால் நியூட்ரானால் தூண்டப்பட்ட அணுக்கருச் செயலீட்டின் நிகழ்திறனை மற்றச் செயலீடுகளின் நிகழ்திறனைவிட எளிதாகக் கணக்கிடலாம். இக் கணக்கீடு மிக எளிதான ஜியோமிதிக் கணக்கீடு ஆகும்.

I நியூட்ரான்கள்/மீட்டர் உடைய சீரான கற்றை ஒன்று 'dx தடிமன் கொண்ட N அணுக்கள்/மீட்டர்^{2} கொண்ட ஓர் இலக்கை ஒரு குறிப்பிட்ட நேரத்தில் தாக்குகிறது எனக் கொள்வோம். இந் நேரத்தில் இலக்கின் 1 சதுர மீட்டர் பரப்பில் dI எண்ணுடைய செயலீடுகள் நிகழ்கின்றன என்று வைத்துக்கொள்வோம். இந்தக் கோட்பாடுகளெல்லாம் இலக்கிற்கு வெளிப்புறத்தைப் பொறுத்தவை என்பது இங்குக் குறிப்பிடத்தக்கது. இச் செயலீட்டில் Ndx கருக்கள் கொண்ட இலக்கின் வழியாக I நியூட்ரான்கள் செல்கின்றதாகையால்,

$$\text{முகப்பரப்பு} = \frac{dI}{Ndx.\, I} \text{ மீட்டர்}^2/\text{கரு} \qquad \dots \quad (8{\cdot}15)$$

அணுக்கரு முகப்பரப்புகள் 10^{-24} மீட்டர்^{2}-லிருந்து 10^{-34} மீட்டர்^{2} வரை உள்ளன. இம் முகப் பரப்புகளை அளக்க 10^{-28} மீட்டர்^{2} (அல்லது 10^{-24} மீட்டர்^{2}) அளவுள்ள பார்ன் (barn) என்ற அலகு பயன்படுத்தப்படுகிறது. அதிக வேகங்கள் கொண்ட நியூட்ரான்கள் நிகழ்த்துகிற கருச்செயலீடு, நியூட்ரான்கள் கருவோடு நேரடி மோதலை ஏற்படுத்தும்போதுதான் நிகழ்கிறது. நேரடி மோதல் இல்லாதபொழுது செயலீடு நிகழ்வதில்லை.

இவ் வகைச் செயலீடுகளுக்கு நாம் முகப்பரப்பைக் கணிப்போம். முன்போலவே dx தடிமன் கொண்ட 1 மீட்டர்^{2} பரப்புக் கொண்ட ஓர் இலக்கை எடுத்துக்கொள்வோம். இந்த இலக்கின் ஓரலகு பரப்பிலுள்ள அணுக்கருக்களின் எண்ணிக்கை

Ndx ஆகும். இவற்றில் ஒவ்வொரு கருவும் 'σ' என்ற முகப் பரப்பைக் கொண்டிருந்தால், அவை கொள்ளும் மொத்தப் பரப்பு $N . dx . \sigma$. இப்பொழுது I நியூட்ரான்கள்/சதுர மீட்டர் கொண்ட அதிக வேகமுடைய ஒரு நியூட்ரான் கற்றை, மேற்கூறிய 1 மீட்டர்^{2} பரப்புள்ள இலக்கைத் தாக்குகிறது எனக் கொள்வோம். $N dx . \sigma$ என்ற பரப்பில் மோதுகின்ற நியூட்ரான்கள் மட்டுமே செயலீட்டை நிகழ்த்த முடியும். எஞ்சியுள்ள நியூட்ரான்கள் செயலீடு நிகழ்த்தாமல் வெளியே சென்றுவிடும். கற்றையிலிருந்து செயலீடு நிகழும்பொருட்டுப் பிரித்தெடுக்கப்படுகின்ற நியூட்ரான்களின் தகைவு dI/I, கருவின் 1 மீட்டர்^{2} பரப்புக்கு நேர்விகிதத்தில் இருக்கும்.

$$\frac{dI}{I} = N\ dx\ .\ \sigma. \qquad \ldots \quad (8 \cdot 16)$$

இது சமன்பாடு 1-ன் மற்றொரு சரியீடேயாகும்.

அதிக வேகம் கொண்ட நியூட்ரான்களை விடுத்து வேறு துகள்கள் செயலீடுகள் நிகழ்த்தும்பொழுது, அதன் முகப்பரப்பு 'σ', இலக்குக் கருவின் நிகரப் பரப்பிற்குச் சமமாக இருக்கும். முகப்பரப்பைத் தவிர, பின்முகப் பரப்புகளும் வரையறுக்கப் படுகின்றன. எடுத்துக்காட்டாக $_{13}Al^{47}$ $(n, p)_{12}Mg^{27}$ செயலீட்டின் முகப்பரப்பு நியூட்ரான்களுக்கு 4 மி. எ. வோ. நியூட்ரான்களே மேற்கண்ட கருச்செயலீட்டை நிகழ்த்த முடியும் என்பது பெறப்படுகின்றது.

8·8. அணுக்கருப் பிணைவு (Nuclear Fusion)

அணுக்கருப் பிளவிலிருந்து நமக்குக் கிடைக்கும் பெருமளவு ஆற்றல் கனமான தனிமங்களின் பிணைப்பு ஆற்றல்/நியூக்ளியானுக்கும், நடுத்தர அணுநிறை எண் உடைய தனிமங்களின் கருப் பிணைப்பு ஆற்றல்/நியூக்ளியானுக்கும் உள்ள வேறுபாட்டிலிருந்துதான் கிடைக்கிறது என்பதைப் பார்த்தோம். இவ்வாறே மிக இலேசான தனிமங்களின் கருப்பிணைப்பு ஆற்றல்/நியூக்ளியான் நடுத்தர அணுநிறை எண் கொண்ட தனிமங்களின் கருப் பிணைப்பு ஆற்றல்/நியூக்ளியானைவிட அதிகமாக இருப்பதால், இவ் வேறுபாட்டிலிருந்தும் அதிக அளவிற்கு ஆற்றல் பெறமுடியுமென்று எண்ண வழி இருக்கின்றது. இரண்டு இலேசான கருக்கள் ஒன்றாகப் பிணைவுற்றால் சராசரிப் பிணைப்பு ஆற்றல்/நியூக்ளியான் குறைவதனால் ஆற்றல் வெளிப்படுகின்றது. இதனை நாம் 'அணுக்கருப் பிணைவு' என்கிறோம். இச் செயலீடுதான் ஹைடிரஜன் குண்டு உற்பத்தி செய்வதற்கும், வெப்பக் கரு

ஆற்றல் (Thermo Nuclear power) கிடைப்பதற்கும் அடிப்படையாக உள்ளது எனலாம்.

இரண்டு கருக்கள் ஒன்றுசேர்ந்து பிணைவுற வேண்டுமென்றல், அவை இரண்டிற்குமிடையே செயல்படும் நிலைமின் விலக்கு விசையைத் தவிர்க்க வேண்டும். எனவே, பிணைவுறும் அணுக்கருக்கள் இரண்டும் அதிக அளவு இயக்க ஆற்றல் கொண்டிருக்கவேண்டும். இவ் வாற்றலின் காரணமாக விலக்கு விசை தவிர்க்கப்பட்டு, கருக்களுக்கிடையே உள்ள கருவிசை செயல்படும் அளவிற்கு அதிக அளவு இயக்க ஆற்றல் படைத்திருக்க வேண்டும். சிறிய அளவில் இந்த அளவு ஆற்றலைக் கருக்களுக்குத் துகள் முடுக்கிகளின்மூலம் கொடுக்க முடியும். ஆனல், பெருமளவிற்கு இச் செயலீடு நிகழ்த்தப்பட வேண்டுமானல் அணுக்கருக்கள் வெப்ப இயக்கம் கொள்ளும் அளவிற்கு அவற்றின் ஆற்றலை அதிகரிக்க வேண்டும். கருச் செயலீட்டுப் பொருள் மிக அதிக வெப்ப நிலையில் வாயு வடிவில் இருக்குமானல், கருவின் சராசரி இயக்கவாற்றல் ஏறத்தாழ இலட்சிய வாயுச் சமன்பாட்டினல் (ideal gas equation) பெறப்படும்.

$$\tfrac{1}{2}\, m\, Va^2 = {}^3/_2\, kT \qquad \ldots \quad (8{\cdot}17)$$

முதலில் இரண்டு கருக்கள் mVa^2 அல்லது $3\,kT$ நிகர ஆற்றலைக் கொண்டு ஒன்றையொன்று நோக்கி வருகின்றன எனக் கொள்வோம். கருக்களின் அணு எண்கள் முறையே Z_1, Z_2 என்றிருந்து, அவை இரண்டிற்குமுள்ள இடைவெளி R என்பது வரை ஒருங்கு வருமானல் அவற்றின் நிலை ஆற்றல் (நிலைமின் விசையினல் ஏற்படுவது) $\dfrac{Z_1\, Z_2\, e^2}{R}$-க்குச் சமமாகும். எனவே,

$$3\,kT = Z_1 Z_2 e^2/R \qquad \ldots \quad (8{\cdot}18)$$

அல்லது

$$T = \frac{Z_1\, Z_2\, e^2}{3kR} \qquad \ldots \quad (8{\cdot}19)$$

$R = 10^{-12}$ செ.மீ. ஆனல் $T = \dfrac{Z_1 Z_2 (4{\cdot}8\times 10^{-10})^2}{3\times 1{\cdot}38\times 10^{-16}\times 10^{-12}}$

$$= 5{\cdot}5\times 10^8\, Z_1\, Z_2\, {}^\circ K \qquad \ldots \quad (8{\cdot}20)$$

Z_1, Z_2 சிறிய அளவு முழு எண்களாக இருப்பதால் T-யின் மதிப்பு ஏறத்தாழ ஒரு மில்லியன் டிகிரி ஆகிறது. சோதனைச் சாலைகளில் 10 மில்லியன் டிகிரிவரை வெப்ப நிலையை இப்பொழுது பெறக்கூடுமென்றலும், இந்த உயர்ந்த வெப்ப நிலையில்

அணுக்கருக்களெல்லாம் எலக்ட்ரான்களாகவும் கருக்களாகவும் உடைபட்டுக் கிடக்கின்றபடியால், இச் செயலீட்டை இன்னும் கட்டுப்படுத்த முடியவில்லை. இத்தகைய உயர்ந்த வெப்ப நிலைகளில் பொருள் வாயு நிலையில் இல்லாமல் பொருளின் நான்காம் நிலையான பிளாஸ்மா நிலையில் இருப்பதால் இதனைக் கட்டுப் படுத்துவது எளிதாக இல்லை. பெரும் வெப்ப நிலைகளில் நிகழும் அணுக்கருப் பிணைவுச் செயலீடுகள் 'வெப்பக்கருச் செயலீடுகள்' (thermo-nuclear reactions) என்றழைக்கப்படுகின்றன.

10^7 °K போன்ற வெப்ப நிலைகள் பூமியின் பரப்பில் இருப்பதில்லை என்றாலும், பரிதி போன்ற விண்மீன்களில் இவ்வளவு வெப்பநிலை சாதாரணமாக நிலவுகின்றன. எனவே, விண்மீன்களில் வெப்பக் கருச் செயலீடுகள் இலகுவில் நிகழ்கின்றன எனலாம். பரிதியின் உட்பரப்பிலும் இவ்வகை செயலீடுகள் தாம் நிகழ்கின்றன என்றும், பரிதி தன் ஆற்றலை இவற்றினின்றும் பெறுகின்றது என்றும் எண்ண இடமிருக்கின்றது.

விண்மீன்களில் நிகழ்கின்ற செயலீடுகளைப்பற்றி நாம் முற்றிலும் அறியவில்லை என்றாலும் அவை கீழ்க்கண்ட இருபடிகளில் நிகழ்கின்றன என முடிவு செய்யலாம். இவற்றுள் முதல் வகைச் செயலீடு புரோட்டான்-புரோட்டான் சுற்று (proton-proton cycle) என்று அழைக்கப்படுகின்றது.

$$_1H^1 + {_1H^1} \longrightarrow {_1H^2} + e^+ + \nu \quad \ldots \quad (8{\cdot}21)$$

$$_1H^2 + {_1H^1} \longrightarrow {_2He^3} \quad \ldots \quad (8{\cdot}22)$$

$$_2He^3 + {_1H^1} \longrightarrow {_2He^4} + e^+ + \nu \quad \ldots \quad (8{\cdot}23)$$

இச் செயலீடுகளின் இரண்டாவது வகைக் 'கரிச் சுற்று' (Carbon Cycle) எனப்படும்.

$$_1H^1 + {_6C^{12}} \longrightarrow {_7N^{13}} \quad \ldots \quad (8{\cdot}25)$$

$$_7N^{13} \longrightarrow {_6C^{13}} + e^+ + \nu \quad \ldots \quad (8{\cdot}26)$$

$$_6C^{13} + {_1H^1} \longrightarrow {_7N^{14}} \quad \ldots \quad (8{\cdot}27)$$

$$_7N^{14} + {_1H^1} \longrightarrow {_8O^{15}} \quad \ldots \quad (8{\cdot}28)$$

$$_8O^{15} \longrightarrow {_7N^{15}} + e^+ + \nu \quad \ldots \quad (8{\cdot}29)$$

$$_7N^{15} + {_1H^1} \longrightarrow {_6C^{12}} + {_2He^4} \quad \ldots \quad (8{\cdot}30)$$

இச் செயலீடுகளின் நடுத்தர விளைப்பொருள்களைப் பற்றி நாம் அதிகம் கவனிக்கவேண்டியதில்லை. இச் செயலீடுகளில் சில

பாசிட்ரான்களும் (R^+) சில நியூட்ரான்களும் உமிழப்படுகின்றன. முடிவாக இச் செயலீட்டிலிருந்து, 4 புரோட்டான்கள் ஒன்றோடொன்று பிணைந்து ஒரு ஹீலியம் கருவாக மாறுகின்றது. விண்மீன்கள், பரிதி ஆகியவற்றின் ஆற்றல்மூலம் கீழ்க்கண்ட செயலீடுகள் நிகழ்கின்றன:

$$_1H^1 + {_1H^1} + {_1H^1} + {_1H^1} \longrightarrow {_2He^4} + e^+ + e^+ + \nu + \nu \quad \ldots \quad (8{\cdot}31)$$

நான்கு புரோட்டான்களின் மொத்த நிறைக்கும் அவற்றின் பிணைவிற்குப் பின் கிடைக்கும் ஹீலியம் கருவின் நிறைக்கும் உள்ள வேறுபாடு ஆற்றலாக மாறுகின்றது. [பாசிட்ரான் நிறை மிகக் குறைவாக உள்ளதாலும், நியூட்ரினோவிற்கு (Nutrino) நிறையே இல்லையாதலாலும் அவற்றின் நிறை கணக்கீட்டில் எடுத்துக் கொள்ளப்படுவதில்லை.] ஹீலியம் கருவின் பிணைப்பு ஆற்றல் அதிகமாக இருப்பதால் கருப்பிணைப்பினால் ஏற்படும் 'நிறைக் குறை'வும் மிக அதிகமாக உள்ளது. எனவே, இந்தக் கருப் பிணைவுச் (nuclear fusion) செயலீட்டில் ஏறத்தாழ ஒரு ஹீலியம் கருவிற்கு 26·7 மி. எ. வோ. ஆற்றல் வெளிப்படுகின்றது. இது $_{92}U^{235}$ கருவின் பிளவுச் செயலீடு ஒன்றில் கிடைக்கும் 200 மி. எ. வோ. ஆற்றலைவிடக் குறைவாக இருந்தபோதிலும் பிணைவுக் கிரியையில் 4 கிராம் ஹைடிரஜனே தேவைப்படுகிறது (பிளவுச் செயலீட்டில் 235கிராம் யுரேனியம் தேவைப்படுகின்றது). எனவே, பிளவுச் செயலீட்டில் ஒரு கிராமிற்குக் கிடைக்கும் ஆற்றலைக் காட்டிலும், பிணைவுச் செயலீட்டில் கிடைக்கும் ஆற்றல் $\left(\frac{26{\cdot}7}{201} \times \frac{235}{4}\right) = 7{\cdot}8$ மடங்கு அதிகமாக இருக்கிறது.

ஓர் அணுகுண்டு வெடிக்கின்றபொழுது ஏறத்தாழ 5×10^7 °K வெப்பநிலை உண்டாகிறது. இவ் வெப்பநிலையில் கருப்பிணைப்பு நிகழ்வது சுலபம். ஹைட்ரஜன் குண்டில் டியூட்ரியம், டிரிடியம், லிதியம் போன்ற இலேசான தனிமங்களின் கலவையும் அணுக் குண்டு ஒன்றும் சேர்த்து வைக்கப்படுகின்றன. அணுகுண்டு வெடிக்கின்றபொழுது மேற்கண்ட தனிமங்கள் ஒன்றாகப் பிணைவுற்று அதிக அளவில் ஆற்றல் கிடைக்கின்றது.

கருப்பிணைவுச் செயலீட்டைக் கட்டுப்படுத்தப் பல முயற்சிகள் நடைபெற்றுவருகின்றன. பிணைவுச் செயலீடு கட்டுப்படுத்தப் பட்டால், அது நமக்குப் பெரிய அளவில் தொடர்ந்து ஆற்றல் அளிக்கும் சாதனமாக இருக்கக்கூடும்.

8·9. செயற்கைக் கதிரியக்கம்

அலுமினியம், போரான் போன்ற இலேசான தனிமங்களை α-கதிர்களைக் கொண்டு தாக்கியபொழுது செயற்கைக் கதிரியக்கம் உண்டாவதை ஐரின் கியூரி, ஃப்ரெடிரிக் ஜோலியோ என்ற விஞ்ஞானிகள் கண்டறிந்தனர். இச் சோதனையில் பாசிட்ரான்கள் வெளியேறுகின்றன என்றும், α-கதிர்களின்மூலம் இவை அகற்றப்படும்பொழுது பாசிட்ரான்களின் செயலூக்கம் நீடித்திருக்கின்றது என்றும் கண்டனர். இச் செயலீடு கீழ்க்கண்டவாறு நடைபெறுகின்றது:

$$ {}_{13}Al^{27} + {}_{2}He^{4} \longrightarrow {}_{15}P^{30} + {}_{0}n^{1} $$
$$ \downarrow $$
$$ {}_{14}Si^{30} + {}_{+1}e^{0} + 3 \text{ மி. எ. வோ.} \quad \ldots (8{\cdot}32) $$

மேற்கண்ட செயலீடுகளில் முதற் செயலீடு தாக்குதல் ஆரம்பித்த உடனேயே நிகழத் தொடங்குகின்றது. இரண்டாவது செயலீடு $3\frac{1}{4}$ நிமிட அரைவாழ்வுக் காலத்தோடு சிறிது தாமதித்து நிகழ்கிறது. பாஸ்பரத்திற்கு அணுநிறை எண் 31 கொண்ட ஒரே நிலையான ஐசோடோப்புதான் (isotope) உள்ளது. எனவே, மேற்கண்ட செயலீட்டிலிருந்து கிடைக்கும் 'அணுநிறை எண் 30 கொண்ட பாஸ்பரம்' கதிரியக்கமுடையதாகத்தான் இருக்க முடியும். கதிரியக்கத்தில் பாஸ்பரம்^{30} ஒரு பாசிட்ரானை உமிழ்ந்து சிலிகானாக மாறுகிறது எனலாம். ஐரின் கியூரியும், ஜோலியோவும் மேற்கண்ட செயலீட்டை 'டிரேசர் வேதியல் முறை'யினால் (Tracer radio chemistry) உண்மையாக்கினார்கள். α-கதிர்களால் தாக்குண்ட சிறிது நேரத்திற்கெல்லாம் அலுமினியம் ஹைடிரோகுளோரிக் அமிலத்தில் கரைக்கப்பட்டது. இக் கரைசல் ஆவியாக்கப்பட்டு எஞ்சும் பொருள் (residue) பாசிட்ரான் செயலூக்கத்திற்காகப் பரிசோதிக்கப்பட்டபொழுது அப் பொருளில் ஒருவிதக் கதிரியக்கமும் காணப்படவில்லை. ஆனால், ஆவி உருவத்திலிருந்த PH_3 வாயு செயலூக்கமுடையதாக இருந்தது. மற்றுமொரு சோதனையில் α-கதிர்களால் தாக்கப்பட்ட அலுமினியம் 'ஆக்வா ரிஜியா'வில் (Aqua Regia) கரைக்கப்பட்டுக் கிடைத்த கரைசலில் சிர்சோனியம் (Zirzonium) சேர்க்கப்பட்டது. அது உடனே Po^{30} அணுவுடன் சேர்ந்து 'சிர்சோனியம் பாஸ்பேட்'டாக மாறியது. இந்த வீழ்படிவு (precipitate) செயலூக்கத்திற்காகச் சோதிக்கப்பட்டபொழுது அது பாசிட்ரான் செயலூக்கம் கொண்டிருப்பது தெரிந்தது. எனவே, செயலூக்கமானது எல்லாப் பொருள்களிலும் பாஸ்பரத்திலேயே இருக்கிறது என்று அறியப்பட்டது.

இதைத் தொடர்ந்து செயற்கைக் கதிரியக்கத்தைப் பற்றி நன்கு கண்டறியப் பல்வேறு சோதனைகள் நிகழ்த்தப்பட்டன. இவற்றில் கதிரியக்கமுடைய ஐசோடோப்புகளைப் பெறப் பெரும்பாலும் நியூட்ரான்களே பயன்படுத்தப்பட்டன. இந்த நியூட்ரான்கள், ரேடியம் - பெரிலியம் மூலத்தைக் கொண்டோ அல்லது பொலோனியம் – பெரிலியம் மூலத்தைக் கொண்டோ உற்பத்தி செய்யப்பட்டன.

நியூட்ரான்களின் வேகங்கள் மீட்சியுறு மோதலினால் குறைக்கப்பட்டு மேற்கண்ட செயலீடுகளில் பயன்படுத்தப்பட்டால், செயற்கைக் கதிரியக்கம் இன்னும் நன்றாகத் தூண்டப்படலாம் என்பது புலனாயிற்று. எடுத்துக்காட்டாக குறைந்த வேகம் கொண்ட நியூட்ரான்கள், போரான் போன்ற தனிமங்களினால் உட்கவரப்படுகின்றன. இதன்பின் நிகழும் செயலீட்டில் லிதியம் தனிமம் உண்டாகிறது.

$$_{0}n^{1}+{}_{5}B^{10} \longrightarrow {}_{3}Li^{7}+{}_{2}He^{4} \qquad \ldots \quad (8{\cdot}33)$$

ஏறத்தாழ 2 மி. எ. வோ. ஆற்றலுள்ள நியூட்ரான்களைவிட வெப்ப நியூட்ரான்களே (ஆற்றல் $\simeq 0{\cdot}025$ எ. வோ.) நல்ல முறையில் செயற்கைக் கதிரியக்கத்தைத் தூண்டுகின்றன எனலாம்.

இவ்வாறு, செயற்கை முறையில் தூண்டப்பட்ட கதிரியக்க ஐசோடோப்புகள் ஆயிரம் ஆயிரம் ஆண்டுகளினின்றும் ஒரு வினாடியின் சிறு பின்ன அளவிற்கு அரைவாழ்வுக் காலம் கொண்டுள்ளன. கீழ்க்கண்ட சமன்பாட்டின்படி பெறப்படுகின்ற Li^{8} ஐசோடோப்பின் அரைவாழ்வுக் காலம் மிகக் குறைந்ததாகவே உள்ளது.

$$_{3}Li^{7}+{}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{3}Li^{8}$$
$$\longrightarrow {}_{2}He^{4}+{}_{2}He^{4}+{}_{-1}e^{0} \qquad \ldots \quad (8{\cdot}34)$$

மிகக் குறைந்த அரைவாழ்வுக் காலங்களை அளப்பதற்கு, தனிப்பட்ட முறைகள் உள்ளன. தூண்டப்பட்ட கதிரியக்கமுடைய பொருள் அணு உலையினின்றும் காற்றழுத்தம் (pressmatic) குழாயினால் வெகு சீக்கிரமாக வெளியேற்றப்பட்டுக் 'கெய்கர் கணிப்பானுக்கு' அண்மையில் வைக்கப்பட்டிருக்கின்றது. கதிரியக்கப் பொருளிலிருந்து வெளிவரும் எலக்ட்ரான்களைக் கணிப்பதன்மூலம் இக் குறைந்த கால அளவுகள் நிர்ணயிக்கப்படுகின்றன.

8·10. செயற்கைக் கதிரியக்கத்தின் பயன்கள்

கதிரியக்கமுடைய பாஸ்வரம் எவ்வாறு செயற்கையாகத் தோற்றுவிக்கப்படுகிறது என முன்பே கண்டோம். இந்தக் கதிரியக்கப் பாஸ்வரம், புற்றுநோய்ச் சிகிச்சைக்காகப் பயன் படுத்தப்படுவதும் அதிக விலையுயர்ந்ததுமான ரேடியத்திற்கு மாற்றாக, மருத்துவ மனைகளில் பயன்படுத்தப்படுகின்றன.

சைக்ளோட்ரானிலிருந்து கிடைக்கும் அதிகத் திசைவேகம் கொண்ட டியூட்ரான்களைச் சோடியம் தனிமத்துடன் சேர்த்துக் 'கதிரியக்க சோடியத்தை' லாரண்ட்ஸ் உற்பத்தி செய்தார். கதிரியக்கச் சோடியம் 15 மணி நேர அரைவாழ்வுக் காலம் கொண்டது. அது மக்னீஷியமாகவும், எலக்ட்ரான்களாகவும் சிதைவுறுகின்றது. γ-கதிர்களும் இவற்றுடன் உமிழப்படு கின்றன.

$$_{11}Na^{23} + {}_1H^2 \longrightarrow {}_{11}Na^{24} + {}_1H^1$$

($_{11}Na^{24}$-கதிரியக்கச் சோடியம்)

$$_{11}Na^{24} \longrightarrow {}_{12}Mg^{24} + {}_{-1}e^0 + \gamma$$

சோடியம் குளோரைடுடன் (சாதாரண உப்பு) கதிரியக்கச் சோடியம் குளோரைடு சேர்க்கப்பட்டு மிருகங்களுக்குக் கொடுக் கப்படுகின்றது. கொடுக்கப்பட்ட இரண்டு நிமிடங்களுக்கெல் லாம் இது இரத்த ஓட்டத்தோடு கலந்துவிடுகின்றது. உடலின் எவ்வெவ் பாகங்களிலெல்லாம் இது செல்கின்றதோ அங்கெல் லாம் இதனைக் கண்டுபிடித்து உப்பு உடலில் எவ்வாறு ஈர்த்துக் கொள்ளப்படுகிறது என அறியலாம்.

தற்பொழுது செயற்கைக் கதிரியக்கமுடைய ஐசோடோப்பு கள் பெருமளவில் அணு உலைகளின்றும் பெறப்படுகின்றன. இவ்வாறு கிடைக்கின்ற கதிரியக்க ஐசோடோப்புகளில் முக்கியத் துவம் வாய்ந்தவை அயோடின்-*131*, பாஸ்வரம்-*30*, கந்தகம்-*35*, கரி-*14*, சோடியம்-*24* போன்றவையாகும். இவை மருத்துவ ஆராய்ச்சிகளுக்கும், பல சிகிச்சைகளுக்கும் பெருமளவில் பயன் படுத்தப்படுகின்றன. இந்தக் கதிரியக்க ஐசோடோப்புகளின் அரைவாழ்வுக் காலங்கள் மிகக் குறைவு ஆகையால் அந்த ஐசோ டோப்புகள் இருக்கும் இடங்களைக் 'கெய்கர் மியூலர் எண்ணி' கொண்டு மிக எளிதாகக் கண்டுபிடித்துவிடலாம். கதிரியக்கப் பொன், புற்று நோய்ச் சிகிச்சையிலும் கதிரியக்கப் பாஸ்வரம் 'லுகிமியா' என்ற நோயைக் குணப்படுத்துவதற்கும், கதிரியக்க அயோடின் நீரிழிவு நோய், இருதய நோய் போன்றவற்றைக் குணப்படுத்துவதற்கும் மருத்துவமனைகளில் பயன்படுத்தப்படு

கின்றன. டிராம்பேவிலுள்ள பாபா அணு ஆராய்ச்சி நிலையம் ஏறத்தாழ 350 கதிரியக்க ஐசோடோப்புகளை உற்பத்தி செய்து 20 நாடுகளுக்கு ஏற்றுமதி செய்கிறது.

தொழிற்சாலை மற்றும் வேளாண்மைத்துறை ஆராய்ச்சி களிலும் இந்தக் கதிரியக்க ஐசோடோப்புகள் பயன்படுத்தப்படு கின்றன. இவற்றை டிரேசர் தனிமங்கள் (Tracer element) என்றழைக்கின்றனர். இந்த ஐசோடோப்புகளின் சில முக்கியப் பயன்களைக் காண்போம்.

(அ) கதிரியக்க ஐசோடோப்புகள் மருத்துவத் துறையில் நோயைக் கண்டுபிடிப்பதற்கும், குணப்படுத்துவதற்கும், மருத்துவ ஆராய்ச்சிக்கும் பயன்படுத்தப்படுகின்றன.

(ஆ) 'கதிரியக்க ஐசோடோப்பு தடிப்பு அளவி'களில் (Radio Isotope thickness gauges) இவை பிளாஸ்டிக், காகிதம், எஃகு அலுமினியத் தகடு ஆகியவற்றின் பருமன்களை அளக்கப் பயன் படுத்தப்படுகின்றன.

(இ) எஃகு வார்ப்படங்கள், பற்றவைப்பு (welding) இணைப்பு களில் பொருள்கள் கெடாதவண்ணம் கதிரியக்க ஐசோடோப்பு கள் பயன்படுத்தப்படுகின்றன.

(ஈ) அதிக அளவில் அரிசி, வேர்க்கடலை போன்றவை விளைவிப் பதற்கும் இவை பயன்படுத்தப்படுகின்றன.

வினாக்கள்

1. அணுக்கருச் செயலீடுகள் பற்றி ஒரு கட்டுரை வரைக.
2. அணுக்கருப் பிணைவு என்றாலென்ன? சூரியனிடமிருந்து நாம் பெறும் ஆற்றலைப் பிணைவுச் செயலீடு கொண்டு எவ்வாறு விளக்கலாம்?
3. ஆற்றல் வெளியிடும் செயலீடுகள், ஆற்றல் உட்கவர்ச் செயலீடுகள் ஆகியவற்றை எடுத்துக்காட்டுகளுடன் விளக்கு.
4. இரண்டு டியூட்ரியம் கருக்கள் ஒன்றாகப் பிணைவுற்று ஒரு ஹீலியம் கருவாக மாறுகிறது என்று வைத்துக்கொள் வோம். டியூட்ரியம் கருவின் நிறை $({}_1H^2)$ = 2.01478 அ.நி. அலகு. ஹீலியம் கருவின் நிறை $({}_2He^4)$ = 4.00338 அ.நி.அ. என்றால் இச்செயலீட்டிலிருந்து கிடைக்கும் ஆற்றலைக் கணக்கிடுக.
5. செயற்கைக் கதிரியக்கம் எவ்வாறு பொருள்களில் தூண்டப்படுகிறது? அது அன்றாட வாழ்க்கையில் எவ்வாறு பயன்படுகிறது?

9. காஸ்மிக் கதிர்கள்

9·1. முன்னுரை

வளிமண்டலத்தில் மின்னூட்டம் பெற்ற துகள்கள் இருக்கக் கூடுமென்ற ஐயம் 1785ஆம் ஆண்டு முதலாகவே இருந்துவந்திருக்கின்றது. ஒரு மின்காட்டியை மிகுந்த எச்சரிக்கையுடன் மின்னிழப்பில்லாமல் செய்தபோதிலும், அது தொடர்ந்து மின்னிறக்கத்தைக் காட்டிக்கொண்டேவந்தது. ஒரு நூற்றுண்டிற்குப் பின்னர், வளி மின்கடத்தியாக இருப்பதற்கு புவிக்கப்பாலுள்ள கதிரியக்கப் பொருள்களினுல் உண்டாகும் அயனியாக்கமும் (ionisation) காரணமாக இருக்கக்கூடும் என்று முடிவுசெய்யப் பட்டது. மின்காட்டி காட்டிடும் மின்னிறக்கம், புவியின் மேலுள்ள கதிரியக்கக் கனிப்பொருள்களால்தான் ஏற்படுகிறது என்ருல், அதற்கும் அதிகமான உயரத்திற்கு மின்காட்டி எடுத்துச் செல்லப்பட்டால் மின்னிறக்கம் ஏற்படாது என விஞ்ஞானிகள் நினைத்தனர். எனவே, 1901—1911 ஆண்டுகளில் கோகல் (Gockel) கெய்கர் (Geiger) என்ற இரண்டு ஜெர்மன் விஞ்ஞானிகள் அயனிக்கலங்களைப் பலூன்களில் வைத்து அவற்றைச் சுமார் 4,000 மீட்டர் உயரம்வரைப் பறக்கவிட்டு அங்கு அயனியாக்கம் உண்டாகின்றதா என அறிய முற்பட்டனர். அவர்கள் அந்த உயரத்திலும் அயனிக்கலத்தில் மின்னிறக்கம் ஏற்படுவதை கண்டனர். ஒரு சில ஆண்டுகளுக்குப் பிறகு ஹெஸ் (Hess) கோல்ஹோஸ்டர் (Kolhorster) என்ற விஞ்ஞானிகள் இன்னும் அதிக உயரங்களுக்குப் பலூன்களில் அயனிக்கலங்களைச் செலுத்தி, உயரம் அதிகமாக அதிகமாக அயனியாக்கமும் அதிகரிக்கிறது எனக் கண்டறிந்தனர். இவ்வாறு அதிக அளவு ஊடுருவும் ஆற்றல் வாய்ந்த இக் கதிர்கள் பூமிக்கு அப்பால் வெகு தொலைவிலிருந்து வெளிவரக்கூடும் என நினைத்தனர். இதைத் தொடர்ந்து மில்லிகனும் (Millikan) இன்னும் பல விஞ்ஞானிகளும் உலகின் பலவேறு இடங்களில் இத்தகைய சோதனைகளை நிகழ்த்தி, மேற்கண்ட கதிர்களின் தன்மைகளை ஆராய்ந்தனர். 1925ஆம் ஆண்டு முதல் இக் கதிர்கள் 'காஸ்மிக் கதிர்கள்' என்று அழைக்கப்பட்டன.

காஸ்மிக் கதிர்களின் செறிவு தரைமட்டத்திலிருந்து உயரச் செல்லச் செல்ல எவ்வாறு வேறுபடுகின்றது என்பதை அறியும் பொருட்டுப் பலூன்கள் மேலே அனுப்பப்பட்டன. இந்தப் பலூன்களில் காற்றில் அயனியாக்கத்தை அளப்பதற்கான கருவிகளும், வெப்ப நிலை, அழுத்தம் ஆகியவற்றை அளப்பதற்கான கருவிகளும் பொருத்திவைக்கப்பட்டிருந்தன. இவ் வளவீடுகள் பலூன்கள் பறக்கும் உயரத்தையும், அந்த உயரத்தில் காணப்படும் அயனியாக்கத்தையும் இணைப்பதற்குப் பயன்படுத்தப் பட்டன. இந்தப் பலூன்கள் சுமார் 27 கிலோ மீட்டர்கள் முதல் 35 கிலோ மீட்டர்கள் உயரம்வரை பறந்தன. படம் 9·1 காஸ்மிக் கதிர்ச்செறிவின் மாறுபாட்டையும் உயரத்தையும் இணைக்கும் வரைபடமாகும். படத்திலிருந்து புவியின் மேற்பரப்பிற்கு அருகாமையில் ஓர் அயனியிரட்டை (Ion pair) க.செ.மீ. வரைதான் அயனியாக்கம் ஏற்படுகிறதென்றும், 2 கி.மீ. உயரத்திற்குப் பிறகு இந்த அயனியாக்கச் செறிவு ஏறத்தாழ 5 அயனியிரட்டை/க. செ. மீட்டராக அதிகரிக்கின்றது என்றும், இன்னும் அதிக உயரத்தில் காஸ்மிக் கதிர்களின் செறிவு குறைகிறதென்றும் தெரிந்துகொள்ளலாம்.

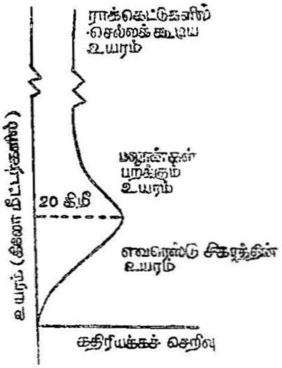
புவியின் அருகாமையில் ஏற்படும் அயனியாக்கம் இரண்டு காரணங்களால் ஏற்படுகின்றது என்று கூறலாம்.

(i) காஸ்மிக் கதிர்களினால் ஏற்படுவது.

(ii) புவியின் மேற்பரப்பிலுள்ள கதிரியக்கக் கனிப்பொருள்களினால் ஏற்படுவது.

இரண்டு கிலோ மீட்டர் உயரத்திற்கு அப்பால் மேற்கூறிய இரண்டாவது காரணத்தினால் ஏற்படும் அயனியாக்கம் ஏறத்தாழச் சுழி எனலாம். ஆனால், 2 கிலோ மீட்டர் உயரத்திற்கு அப்பால், காஸ்மிக் கதிர்கள் பெருமளவில் அயனியாக்கத்தை ஏற்படுத்துகின்றன.

இந்தக் காஸ்மிக் கதிர்கள் உலோகங்களை ஊடுருவும் சக்தியை மிகுந்த அளவில் பெற்றுள்ளன. இப் பண்பினின்றும், இவை ஒருவேளை γ கதிர்கள் போன்ற கதிர்களா என ஐயமுற்றனர். 'பொத்தே' (Boethe), 'கோல்ஹார்ஸ்டர்' (Kolhorster) என்ற விஞ்ஞானிகள் இதனை நன்கு ஆராய்ந்து காஸ்மிக் கதிர்கள் γ கதிர்கள் போன்றவை அல்ல என்றும், அவற்றில் மின்னூட்டம் கொண்ட துகள்கள்தான் உள்ளன என்றும் ஐயமற மெய்ப்பித்தனர். 1927ஆம் ஆண்டு கிளே (Clay) என்ற விஞ்ஞானி காஸ்மிக் கதிர்ச் செறிவு புவிகாந்தத் தீர்க்கரேகையைப் பொறுத்திருக்



படம் 9·1
உயரத்தையும், காஸ்மிக் கதிர்களையும் இணைக்கும் ஒரு வரைபடம்

கிறது எனக் கண்டுபிடித்தார். அதாவது புவிகாந்த பூமத்திய ரேகையின் பக்கத்தில் இச் செறிவு குறைந்தும் துருவங்களில் மிகுதியாகவும் இருப்பதையும் அறிந்தார். இதனின்றும் காஸ்மிக் கதிர்கள் மின்னூட்டம் பெற்ற துகள்களாகவே இருக்கவேண்டுமென்பது புலனுகின்றது. மேலும் காஸ்மிக் கதிர்கள் இரு கூறுகளாக இருக்கவேண்டும் என்பதும் கண்டுபிடிக்கப்பட்டது. பொருள்களினூடே மிகுந்த தொலைவு ஊடுருவும் பகுதி 'கடினக் கூறு' (hard component) எனவும், குறைந்த தொலைவு ஊடுருவக் கூடிய பகுதி 'மென்கூறு' (soft component) எனவும் அழைக்கப்பட்டன.

9·2 காஸ்மிக் கதிர்களின் தன்மைகள்

வளிமண்டலத்தின் மேற்பகுதிகளில் காணப்படுகின்ற காஸ்மிக் கதிர்கள் முதன்மை காஸ்மிக் கதிர்கள் (primary casmic rays) என அழைக்கப்பட்டன. இவை ஏறத்தாழ அண்டவெளியில் தோற்றுவிக்கப்பட்டன எனலாம். இவை சார்புத் திசைவேகங்களோடு இயங்குகின்றன. வளிமண்டலத்தின் வாயுக்களோடு இவை செயலீடு நிகழ்த்தி, வலிமை குன்றிய "துணை காஸ்மிக் கதிர்களை" (secondary cosmic rays) தோற்றுவிக்கின்றன. முதன்மைக் காஸ்மிக் கதிர்கள் சில நேரங்களில் 10^{19} எலக்ட்ரான் வோல்ட்டு ஆற்றலைப் பெற்றிருக்கின்றன. முதன்மைக் கதிர்களில் பெரும்பாலும் அதிகத் திசைவேகம் கொண்ட புரோட்டான்களே காணப்படுகின்றன. இவற்றைத் தவிர ஒரு சில பாசிட்ரான்களும், எலக்ட்ரான்களும் புரோட்டான்களும்

உள்ளன. முதன்மைக் கதிர்களில் ஏறத்தாழ 85 சதவீதம் புரோட்டான்களும் 13-14 சதவீதம் α துகள்களும் 1 சதவீதம் கரி, நைட்ரஜன், ஆக்சிஜன், நியான் (Neon) மக்னீஸியம், இரும்பு, கோபால்டு, நிக்கல் போன்ற கனமான தனிமங்களும் இருக்கின்றன என கண்டுபிடிக்கப்பட்டுள்ளது. காஸ்மிக் கதிர்களின் சராசரி ஆற்றல் 6 BeV பெரும ஆற்றல் 10^{10}BeV நடைமுறையில் துகள் முடுக்கிகள் தோற்றுவிக்கும் துகள்களின் பெரும ஆற்றல் மிகவும் குறைந்ததே (ஒருசில BeV-க்களே) என்பது இங்குக் குறிப்பிடத்தக்கது.

முதன்மைக் காஸ்மிக் கதிர்கள் வளிமண்டலத்திலேயே செயவிடுகள் நிகழ்த்தித் துணை காஸ்மிக் கதிர்களைத் தோற்றுவிப்பதால்கடல்மட்ட அளவில் அவை தென்படுவதில்லை. இத் துணைக் கதிர்கள் எலக்ட்ரான்கள் μ-மீசான்கள், ஃபோட்டான்கள் (Photon) ஆகியவற்றைத் தம்முள் கொண்டிருக்கின்றன. முதன்மைக் கதிர்களிலுள்ள புரோட்டான்கள் வளிமண்டலத்தை அடையும்பொழுது ஏற்படும் நிகழ்ச்சிகளைப் படம் 9·1 காட்டுகிறது. இவ்வாறு கிடைக்கும் காஸ்மிக் கதிர்களின் ஆற்றல்கள் 10^7 எ. வோ. முதல் 10^{19} எ வோ. வரை பரவியிருக்கின்றன. 1·5 BeV/ நியூக்லியான்களுக்குமேல் காஸ்மிக் கதிர்களின் செறிவு மாறாதிருக்கிறது. குறைந்த ஆற்றல் பெற்ற கதிர்களின் செறிவு மாறிலியாக இல்லாமல் பரிதியின் செயலூக்கத்தால் பாதிக்கப்பட்டு, வேறுபாடு கொண்டிருக்கிறது. சூரியனின் பரிதிப்புள்ளிச் செயலூக்கம் (sunspot activity) ஏற்படுகின்றபொழுது அதிக அளவு துகள்கள் வளிமண்டலத்திற்கு அப்பாலேயே நின்றுவிடுவதால் காஸ்மிக் கதிர்ச்செறிவு மிகக் குறைந்து காணப்படுகின்றது.

பல ஆண்டுகளாக, முதன்மைக் காஸ்மிக் கதிர்கள், வளிமண்டலத்திற்குப் புறம்பே இருந்துவரும் அதிக ஆற்றல் பெற்ற போட்டான்களாகத்தான் இருக்க முடியும் என்றும், இந்த போட்டான்கள் வளிமண்டலத்திலுள்ள நைட்ரஜன் ஆக்ஸிஜன் ஆகியவற்றின் அணுக்களோடு மோதிக் காம்ப்டன் விளைவுக்குள்ளாகி அதிக ஆற்றல் கொண்ட எலக்ட்ரான்களை உற்பத்தி செய்கின்றன என்றும், இவ்வாறு கிடைக்கின்ற எலக்ட்ரான்கள் வளிமண்டலத்தில் மீண்டும் அயனியாக்கம் ஏற்படுத்தக்கூடும் என்றும் முடிவு செய்திருந்தனர். இச் செயலீட்டைக் கொண்டு காஸ்மிக் கதிர்களின் பல பண்புகளை விளக்கமுடியும் என்றும் முடிவு செய்தனர். ஆனால், பொதேவும் கோல் ஹர்ரஸ்டரும் தங்கத் தகடுகளால் காஸ்மிக் கதிர்கள் உட்கவரப்படுகின்றன என்பதைச் சோதனை மூலம் கண்டறிந்தனர். எனவே காஸ்மிக் கதிர்கள் போட்டான்

களைக் கொண்டிருக்கவில்லை என்றும், மின்னூட்டம் பெற்ற துகள்களைத்தான் கொண்டிருக்கின்றன என்றும் ஐயமற அவர்கள் நிரூபித்தனர்.

அட்டவணை 9·1

காஸ்மிக் கதிர்களிலுள்ள துகள்களின் ஆற்றல் நிரல் (*E*-என்பது ஒரு நியூக்லியானின் ஆற்றலை *GeV*-ல் கொடுக்கிறது)

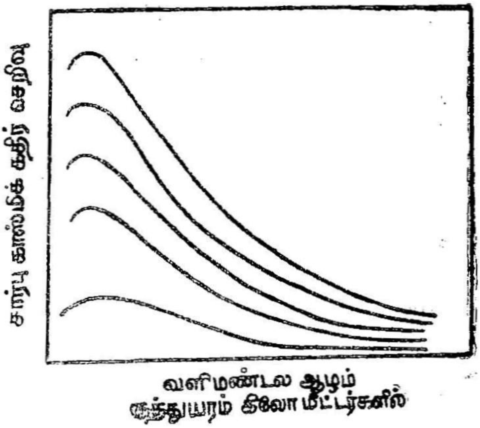
அணுக்கரு	ஆற்றல் நெடுக்கம் *BeV*/நியூக்லியான் [காட்டாக ஹீலியம் 4 நியூக்லியான்கள் கொண்டது]	துகள் செறிவு [1 ச.மீ. பரப்பில் ஓரலகு கோணத்திலுள்ள துகள்களின் எண்ணிக்கை]
H	2 — 20	$400\ E^{-8/7}$
He	15 — 8	$460\ E^{-7/4}$
Li, Be, B	—	$12\ E^{-7/4}$
C, N, O, F,	3 — 8	$24\ E^{-7/4}$
Ne-யும் அதன் பின்னர் உள்ள தனிமங்களும்	3 — 8	$16\ E^{-2}$

9·3. குத்துயர விளைவு (altitude effect)

காஸ்மிக் கதிர்களின் செறிவு உயரச் செல்லச் செல்ல அதிகமாகிறது எனவும், அதனால் அவற்றின் தோற்றுவாய் பூமிக்கு வெகு தொலைவில் இருக்கவேண்டும் என்றும் முன்பே கூறினோம். குறிப்பிட்ட ஒரு தீர்க்க ரேகையில் அமைந்திருக்கும் ஓரிடத்தில் வெவ்வேறு திசைகளிலிருந்து வந்தடையும் காஸ்மிக் கதிர்ச் செறிவுகள் படம் 9·2-ல் காட்டப்பட்டுள்ளன. இவ் வரைபடம் வளிமண்டல ஆழத்திற்கும் (atmospheric depth) காஸ்மிக் கதிர்ச் செறிவுகளுக்கும் இடையே வரையப்பட்டிருக்கிறது.

வரைபடம் 9.2-லிருந்து பின்வரும் உண்மைகளைப் பெறலாம்.

நிகர காஸ்மிக் கதிர்ச்செறிவு (முதன்மை + துணை) புவிகாந்தத் தீர்க்கரேகை அதிகமாகும் பொழுது அதிகமாகின்றது.



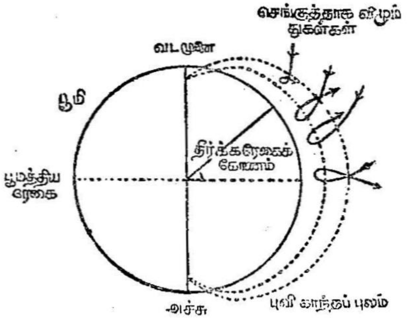
படம் 9·2
காஸ்மிக் கதிர்ச் செறிவிற்கும் குத்துயரத்திற்குமிடையே வரையப்படும் வரைபடம்
3 முதல் 60°N புவிசாந்தத் தீர்க்கரேகைகட்கு வரையப்பட்டுள்ளன

அதிகக் குத்துயரங்களில் இச் செறிவு வெளிப்படையாகத் தெரிகிறது. தவிர உயரம் அதிகரிக்கும்போது கதிர்களின் செறிவும் அதிகமாகின்றது. பின்னர்ச் செறிவு குறையத் தலைப்படுகிறது. காஸ்மிக் கதிர்ச்செறிவின் குத்துயர வேறு பாட்டைக் கீழ்க்கண்டவாறு விளக்கலாம்.

அதிக உயரத்தில் வளிமண்டலத்தில் புரோட்டான்களே அடங்கிய காஸ்மிக் கதிர்கள் கருக்களோடு மோதிச் செயலீடுகள் நிகழ்த்தும்போது π மீசான்கள், μ மீசான்கள், பாசிட்ரான், எலக்ட்ரான், ஃபோட்டான் போன்ற பல துகள்கள் வெளிவருகின்றன. 20 கிலோ மீட்டர் உயரத்தில் இவற்றின் உற்பத்தி அதிக அளவில் உள்ளது. இந்த இரண்டாம் நிலைத் துகள்கள் வளிமண்டலத்தினுள் புகுந்துவரும்போது கொஞ்சம் கொஞ்சமாக உட்கவரப்படுகின்றன. இதன் பின்னர் ஆற்றலை ஏறத்தாழ இழந்துவிட்ட முதனிலைத் துகள்களால் மறுபடியும் இரண்டாம்நிலைத் துகள்களை உற்பத்திசெய்ய முடியாமற் போகின்றது. எனவே, காஸ்மிக் கதிர்ச்செறிவு முதலில் ஒரு சிறிது வேகமாகவும், கடல் மட்டத்தில் நிதானமாகவும் குறையத் தலைப்படுகிறது. கடல்மட்டத்தில் கிடைக்கும் துகள்களெல்லாம் ஏறத்தாழ μ மீசான்களாகவும் எலக்ட்ரான்களாகவுமே உள்ளன.

9·4. தீர்க்கரேகை விளைவு (latitude effect)

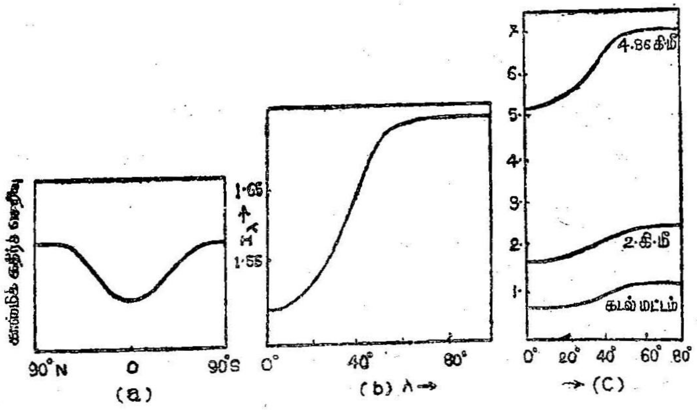
காஸ்மிக் கதிர்கள் மின்னூட்டம் கொண்ட துகள்கள் ஆனதால் அவை புவிக் காந்தத்தினால் பாதிக்கப்பட வேண்டும் என்றுகூறுவது நியாயமானதே. புவிக்காந்த இருமுனைத்திருப்புத் திறன் சுமார் 10^{9} வீபர்/சதுர மீட்டர் ஆகும். காந்தப் பூமத்திய ரேகையில் அதன் காந்தப் புல வலிமை 3×10^{-5} வீபர்/மீட்டர் ஆகும். புவியின் துருவங்களின் அருகே வளிமண்டலத்தின்மீது செங்குத்தாக விழும் கதிர்கள் புவிக் காந்தப்புலத்தினால் பாதிக்கப் படுவதில்லை. ஏனெனில் இக் கதிர்கள் புவிக் காந்தப்புலக் கோடுகளுக்கு இணையாக விழுகின்றன. பூமத்திய ரேகைக்கு அருகாமையில் புவிக் காந்தப்புலம் காஸ்மிக் கதிர்கள் விழும் திசைக்குச் செங்குத்தாக இருப்பதால் செயலீடுகள் மிக அதிகமாக இருக்கின்றன. எனவே, குறைந்த ஆற்றல் பெற்ற துகள்களெல்லாம் அவை தொடக்கத்தில் சென்று கொண்டிருந்த பாதைகளினின்றும் விலக்கப்படுகின்றன. ஒரு குறிப்பிட்ட ஆற்றலுக்கு அதிகமான ஆற்றலுடைய துகள்கள்தாம் (இது தீர்க்கரேகைக் கோணத்தைப் பொறுத்தது) புவியின் மேற்பரப்பை வந்தடைய முடியும். இது படம் 9·3-ல் காட்டப்பட்டுள்ளது.



படம் 9·3
புவிக்காந்தப் புலத்தினால் வளைக்கப்படும் காஸ்மிக் கதிர்த் துகள்கள்

தீர்க்கரேகைக் கோணத்தை ஒட்டிய காஸ்மிக் கதிர்ச் செறிவை முதன்முதலாகக் கிளே (Clay) என்பவர்தாம் 1929-ல் கண்டறிந்தார். இதனைக் காம்ப்டன் பரிசீலித்து ஒரு முடிவான அறிக்கையை வெளியிட்டார். 50 பாகைக்கும் முடிவான கோணங்களில் காஸ்மிக் கதிர்ச்செறிவு குறையத் தலைப்படுகிறது. $\lambda = 50^{\circ}$ என்ற மதிப்பு வரைபட வளைகோட்டின் 'முட்டி' (knee) என அழைக்கப்படுகிறது. புவிக் காந்தத் தீர்க்கரேகையை

ஒட்டிய காஸ்மிக் கதிர்ச்செறிவின் வளைவு படம் 9·4-ல் காட்டப் பட்டுள்ளது.



படம் 9·4.
புவிக்காந்தத் தீர்க்க ரேகைக் கோணத்தை ஒட்டிய காஸ்மிக் கதிர்ச் செறிவின் வேறுபாடு

(a) 0° முதல் 90°N வரையிலும் 0° முதல் 90°S வரையிலும் உள்ள வேறுபாடு

(b) $I\lambda - \lambda$ வேறுபாட்டின் அளவு ரீதியான வரைபடம்.

(c) வெவ்வேறு குத்துயரங்களில் I, λ வேறுபாடு.

படம் 9·4-லிருந்து பின்வருவனவற்றை அறியலாம்.

(i) தீர்க்கரேகை 58-லிருந்து 90° வரை கதிர்ச்செறிவு அநேகமாகச் சமமாக இருக்கிறது எனலாம்.

(ii) $\frac{I\cdot 90^\circ}{I\cdot 0^\circ}$-ன் மதிப்பு குத்துயரம் அதிகரிக்க அதிகரிக்க அதிகமாகின்றது. எனவே, குத்துயர விளைவு அதிகக் குத்துயரங்களில் நன்ருகப் புலப்படுகின்றது.

(iii) 50° தீர்க்கரேகைக்கு அப்பால் காஸ்மிக் கதிர்ச்செறிவு மாருமல் இருப்பதால், F சிறும ($\approx 19\cdot 2005^4 50^\circ$ BeV) மதிப்புள்ள ஆற்றலுக்குக் குறைவாக ஆற்றல் படைத்த முதன்மைக் காஸ்மிக் கதிர்களெல்லாம் பெரும்பாலும் வளிமண்டலத்திற்கே வருவதில்லை என அறியலாம். பூமத்திய ரேகையின் அருகில் 19·2 BeV சிறும ஆற்றலுடைய துகள்களே வளிமண்டலத்தை அடையக் கூடும். இதைவிடக் குறைந்த ஆற்றலுடைய முதன்மைக் கதிர்களெல்லாம் அதிகக் குத்துயரத்தில் புவிக் காந்தப்புலத்தினுல் தடுக்கப்படுகின்றன. இந்த இடங்களையெல்லாம் வான் ஆலன் 'பெல்ட்' (Van Allen Belt) எனப் பெயரிட்டிருக்கிருர். இந்தப் பெயர் கொண்டவர் செயற்கைக் கோள்களை வானில் செலுத்தி இக்

கொள்கையை 1958ஆம் ஆண்டு நிறுவினர். இவை 'டோராய்டு' (toroid) உருவம் பெற்ற ஆற்றல் வட்டங்களாகும். இவை தம்முள் மிகுந்த செறிவுடைய, ஆனல் குறைந்த ஆற்றல் கொண்ட துகள்களைக் கொண்டிருக்கின்றன. இந்தப் பெல்ட்டின் அச்சு புவியின் காந்த அச்சோடு ஒன்று சேர்ந்துள்ளது எனலாம்.

9·5. கிழக்கு-மேற்கு எதிர்ச் சீரமைவு (East-West Asymmetry)

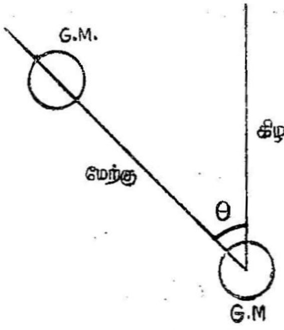
காஸ்மிக் கதிர்கள் மின்னூட்டங்கொண்ட துகள்களென்றல் புவிக்காந்தத்தின் காரணமாக மேற்கிலிருந்தும் கிழக்கிலிருந்தும் வரும் கதிர்களுக்கிடையே வேறுபாடு இருக்க வேண்டும் என 1930ஆம் ஆண்டு ராசி என்பவர் நினைத்தார். கதிர்கள் நேர் மின்னூட்டம் கொண்டவை என்றல், பிளமிங்கின் இடக்கை விதிப்படி அவை புவிக்காந்தத்தினல் கிழக்கு நோக்கி விலக்க மடையக்கூடும். எனவே, துகள்கள் மேற்கிலிருந்து வருகிற மாதிரி புலப்படவேண்டும். துகள்கள் எதிர்மின்னூட்டம் கொண்டிருக்குமேயானல் அவை மேற்கு நோக்கி விலக்கமடையும் ஆகையால் காஸ்மிக் கதிர்களில் பெரும்பாலானவை நேர் மின்னூட்டம் கொண்டவையெனில், மேற்கிலிருந்து வரும் துகள்களின் எண்ணிக்கை கிழக்கிலிருந்து வரும் துகள்களின் எண்ணிக்கையைவிட மிக அதிகமாக இருக்கவேண்டும். அதாவது காஸ்மிக் கதிர்ச்செறிவில் ஒரு 'கிழக்கு-மேற்கு' எதிர்ச் சீரமைவு' (East-West Asymmetry) இருக்க வேண்டும்.

இந்த எதிர்ச்சீரமைவுமூலம் இரண்டு, கெய்கர் மியூலர் எண்ணிகளை (counters) ஒருமுகமாகப் படத்தில் காட்டியவாறு வைத்துச் சோதனை செய்து விளக்கலாம். படத்தில் காட்டப்பட்டிருக்கும் எண்ணிகளின் அமைப்பு, எண்ணித் தொலை நோக்கி (counter telescope) என அழைக்கப்படுகிறது.

அட்டவணை 9·2

படம் காட்டும் சோதனையின் முடிவுகள்

θ பாகைகள்	$\frac{\text{மேற்கு எண்ணிக்கை}}{\text{கிழக்கு எண்ணிக்கை}}$
30	1·08
45	1·10
65	1·05



படம் 9·5
காஸ்மிக் கதிர் கிழக்கு-மேற்கு எதிர்ச் சீரமைப்புச் சோதனை

செங்குத்துத் திசைக்கு θ பாகை மேற்கில் ஒரு வினடியில் கிடைக்கும் ஒருமுக எண்ணிக்கைக்கும், (coincidence counts) θ பாகை கிழக்கில் ஒரு வினடியில் கிடைக்கும் ஒருமுக எண்ணிக்கைக்கும் உள்ள தகவுகள் சோதனைமூலம் கண்டறியப்பட்டன. இதன் முடிவுகளை அட்டவணை 9·2-ல் காணலாம். கிழக்கு-மேற்கு எதிர்ச்சீரமைவிலிருந்து காஸ்மிக் கதிர்களில் நேர்மின்னூட்டம் கொண்ட துகள்கள் எதிர்மின்னூட்டங்கொண்ட துகள்களைவிட அதிக அளவில் இருக்கின்றன என அறியலாம். தவிரவும், புவிக் காந்தத் தீர்க்கரேகை 45 பாகைக்குமேல் இந்தக் கிழக்கு-மேற்கு எதிர்ச்சீரமைவு ஏறத்தாழ மறைந்துவிடுகிறது எனலாம்.

9·6. கடல்மட்டத்தில் காஸ்மிக் கதிர்கள்

கடல்மட்டத்தில் நிலவும் காஸ்மிக் கதிர்களெல்லாம் ஏறத்தாழத் துணைக் கதிர்களே! முதனிலைக் கதிர்கள் புவியின் வளிமண்டலத்திலுள்ள அணுக்கருக்களோடு செயலீடுகள் நிகழ்த்துவதால் உற்பத்தியாகும் புரோட்டான்களே இவற்றில் பெரும்பாலும் நிறைந்திருக்கின்றன. முதனிலைப் புரோட்டான்கள் ஏறத்தாழக் கடல்மட்டத்தை அடைவதில்லை எனலாம். வளிமண்டலத்தில் தோற்றுவிக்கப்படும் π மீசான்கள் (நிறை 273 me) μ மீசான்களாகவும் (நிறை 206 me) எலக்ட்ரான்களாகவும், நியூட்ரான்களாகவும் தேய்வுறுகின்றன. மேலும் தொடர்ந்து நிகழ்கின்ற செயலீடுகளினால் பாசிட்ரான்கள், ∴போட்டான்கள் பொதிந்துள்ள துணைக்கதிர்களும் தோன்றுகின்றன. π° மீசான்கள் தேய்வுறுவதால் கிடைக்கும் γ கதிர்கள் வளிமண்டலத்தில் இரட்டைத்துகள் (pair production) உற்பத்திக்குக் காரணமாக இருக்கின்றன. இந்த இரட்டைத் துகள் பிரெம்ஸ்ட்ராலிங் (Bremssrahling) என்ற 'உடையும் கதிரியக்க' நிகழ்ச்சியினால்

மறுபடியும் γ கதிர்களைத் தோற்றுவிக்கின்றன. எலக்ட்ரான் ஃபோட்டான் பாறல் என்ற இந்த நிகழ்ச்சி π° தேய்வு ஆற்றலெல்லாம் அழிவுறுகிறவரையில் தொடர்ந்து நிகழ்கிறது. இறுதியாகக் கடல்மட்டத்தில் மூன்று வகைத் துணைத்துகள்கள் காணப்படுகின்றன.

(i) $e^{\pm}$, ∴போட்டான்களைக் கொண்ட மெல்லிய கூறு.

(ii) $\mu^{\pm}$ மீசான்கள், நியூட்ரினோக்களைக் கொண்ட கடினக் கூறு.

(iii) நியூட்ரான்கள் புரோட்டான்களைக் கொண்ட மூன்றாவது வகை.

9·7. முதல்நிலை காஸ்மிக் கதிர்களில் மின்னூட்ட ஆற்றல் நிலைகள்

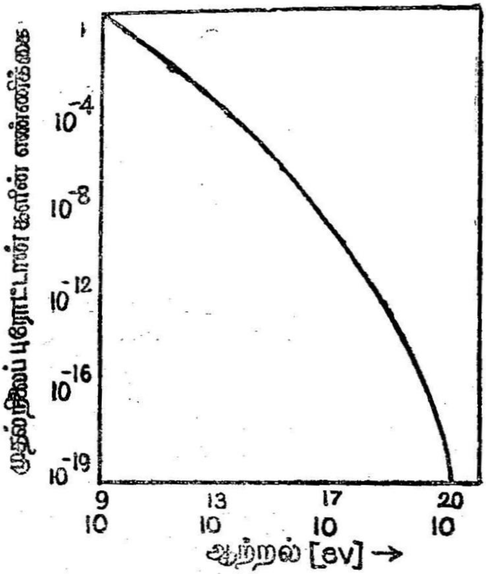
முதனிலைக் காஸ்மிக் கதிர்களில் புரோட்டான்களைத் தவிர, நிறை அதிகமுடைய மின்னூட்டம் கொண்ட துகள்கள் இருக்கக் கூடுமென 1943ஆம் ஆண்டு பல விஞ்ஞானிகள் கருதினர். முகில் கலத்தில் காணப்பட்ட பாதைக் கோடுகளும் காஸ்மிக் கதிர்களில் அணுஎண் 11 முதல் 41 வரையுள்ள அணுக்கருக்கள் இருக்கலாம் என்பதை வலியுறுத்தின. தொடர்ந்து ஹீலியம், லிதியம், பெரிலியம் மற்றும் அணுஎண் 50 வரையுள்ள அணுக்கருக்களும் காஸ்மிக் கதிர்களில் இருப்பது தெரியவந்தது, இந்த, மின்னூட்டம் பெற்ற துகள்களைத் தவிர்த்து ஃபோட்டான்களும் முதல் நிலைக் காஸ்மிக் கதிர்களில் இருக்கின்றன என்பதற்குச் சான்றுகள் உள்ளன. இந்தப் போட்டான்கள் பரிதியிலிருந்தும் வெளியிலுள்ள நண்டு நெபுலா (crab nebula) போன்ற மூலங்களிலிருந்தும் தோற்றுவிக்கப்படுகின்றன. இருப்பினும், மின்னூட்டம் கொண்ட துகள்களின் எண்ணிக்கையோடு ஒப்பிட்டுப் பார்க்கும்போது இந்தப் போட்டான்களின் எண்ணிக்கை மிகக் குறைவே.

முதல்நிலைக் காஸ்மிக் கதிர்களின் ஆற்றல்நிலை நாம் முன்பு பார்த்தபடி 10^{9} எலக்ட்ரான் வோல்ட்டிலிருந்து 10^{19} எ. வோ. வரை பரவியுள்ளது. துகள்களின் சார்பு எண்ணிக்கையை ஒரு நியூக்லியான் ஆற்றலின் தொடராகக் காண்பித்தோமானால் படம் 9·5-ல் இருப்பதுபோல் அமையும். காட்டாக, 10^{9} எ. வோல்ட்டுக்கும் அதிகமான ஆற்றலுடைய புரோட்டான்களின் எண்ணிக்கை தோராயமாக ஒன்று எனக் கொள்ளப்பட்டுள்ளது. இவ் வாற்றலைவிட அதிகமான ஆற்றலையுடைய துகள்களின் எண்ணிக்கையை [காட்டாக 10^{13} எ. வோ.] $E=10^{13}$ என்ற ஆயத்திலிருந்து கணித்துவிடலாம்.

அட்டவணை 9·3

முதன்நிலை காஸ்மிக் கதிர்களிலுள்ள அணுக்கருக்களின் சார்பு மலிவு

அணுக்கரு	அணு எண் Z	எண்ணிக்கை (சார்பானது)
1. ஹைடிரஜன்	1	1·00
2. ஹீலியம்	2	6·5
3. குறைந்த நிறை உடையவை	3 – 5	0·15
4. நடுத்தர நிறை உடையவை	6 – 9	0·4
5. நடுத்தர + அதிக நிறையுடையவை	10 – 19	0·18
6. அதிக நிறையுடையவை	20–க்கு மேல்	0·17



படம் 9·6

முதல்நிலைக் காஸ்மிக் கதிர்த் துகள்களுக்கும் அவற்றின் ஆற்றல்களுக்கும் இடையே உள்ள தொடர்பின் வரைபடம்.

வரைபடம் 9·6-லிருந்து மிகுந்த அளவு ஆற்றல் பெற்ற துகள் களின் எண்ணிக்கை மிகக் குறைவே என்பதை அறியலாம். காட்டாகப் புவியின் வளிமண்டலத்தை அடையும் 10^{19} *ev* ஆற்றல் பெற்ற துகள்கள் வினாடிக்கு ஒன்றோ அல்லது இரண்டோ இருக்கலாம். இந்த அளவு அதிக ஆற்றல் படைத்த துகள்கள் காஸ்மிக் கதிர்களிலிருப்பது இவற்றின் தோற்றுவாயை நாம் அறிந்துகொள்ள உதவுகிறது. மேலும், அவை பூமியை அடைவ தற்குமுன் மிகுந்த அளவில் முடுக்கம் பெறுகின்றன என்பதும் புலனாகின்றது.

9·8. காஸ்மிக் கதிர்ப் பாறல் (Cosmic Ray Showers)

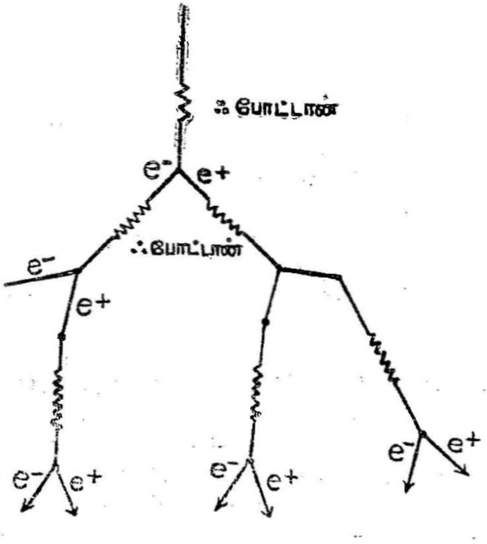
ஒரே நேரத்தில் தோன்றிய பலவேறு காஸ்மிக் கதிர்கள் புவிப்பரப்பை வந்தடைகின்றன. இவையெல்லாம் ஒரே நிகழ்ச்சி யில் உருப்பெற்றவையாக இருக்கக்கூடுமென எண்ணப்படுகிறது இக் கதிர்க் குழாங்கள் காஸ்மிக் கதிர்ப் பாறல்கள் என அழைக்கப்படுகின்றன.

1928ஆம் ஆண்டு ஸ்கோபெல்ட்ஷின் (Skobeltyn) என்ற ருஷ்ய விஞ்ஞானி மேகக்கலத்தில் உண்டான துகள் பாதைகளைப் புகைப்படமெடுத்தார். இந்தத் துகள் பாதைகளெல்லாம் குழுக்க ளாகக் காணப்படுவதோடு அன்றி, மேகக்கலத்தின்மேல் ஒரு குறிப்பிட்ட புள்ளியினின்றும் உற்பத்தியாகின்றன என்று நினைத்தார்.

காஸ்மிக் கதிர்ப் பாறல் ஏற்படுவதைக் கொள்கைமூலம் விளக்குவதற்குப் பலர் முயன்றனர். 1937ஆம் ஆண்டு பாபா, (Bhaba). ஹைட்லர் (Heitler), ஓப்பன்ஹைமர் (Oppenheimer) ஆகிய விஞ்ஞானிகள் இந்தப் பாறல் உற்பத்திக்கான காரணத்தை விளக்கினர். காஸ்மிக் கதிரிலுள்ள நேர்மின்னூட்டம் அல்லது எதிர்மின்னூட்டம் கொண்ட, ஓர் அதிகச் சக்தி வாய்ந்த பாஸிட் ரான் அல்லது எலக்ட்ரான் வளிமண்டலத்திருக்கிற அணுக் கருக்களோடு மோதிச் செயலீடு நிகழ்த்துகையில் தங்கள் ஆற்றலை இழக்கின்றன. இந்த ஆற்றல் அதிக அளவு ஆற்றல் பெற்ற ∴போட்டான் துகள்களாக மாற்றப்படுகின்றன. இந்தப் போட் டான்களில் ஏதாவது ஒன்று ஓர் எலக்ட்ரான் அணுக்கருவிற்கு அருகாமையிலுள்ள கூலும் புலத்தில் செயலீடுகள் நிகழ்த்தி ஓர் எலக்ட்ரான்—பாசிட்ரான் இரட்டையைத் தோற்றுவிக்கிறது.

இவ்வாறு, ஆற்றல் துகள்களாக மாறுகின்ற நேரத்தில், ஃபோட்டானின் ஆற்றல் 1 மி. எ. வோல்ட்டுக்கு மேலாகக் குறைகிறது. பாசிட்ரான் எலக்ட்ரான் இரட்டை தோற்றுவிக்கப்பட்டு, எஞ்சியுள்ள ஆற்றல் இத் துகள்களின் இயக்க ஆற்றலாகக் கொடுக்கப்படுகிறது. (ஒரு பாசிட்ரான் — எலக்ட்ரான் இரட்டையைத் தோற்றுவிக்கத் தேவைப்படும் சிறும ஆற்றல் $= 2 \times 0{\cdot}511$ அல்லது 1·022 மி. எ. வோ. ஆகும்.) தோற்றுவிக்கப்பட்ட எலக்ட்ரான் பாசிட்ரான் துகள்கள் தனித்தனியே மறுபடியும் அணுக்கருக்களோடு செயலீடுகள் நிகழ்த்தி ஃபோட்டான்களை உற்பத்தி செய்ய வல்லவையாக இருக்கின்றன. இவை தொடர்ந்து எலக்ட்ரான்—பாசிட்ரான் இரட்டையைத் தோற்றுவிக்கின்றன. இந் நிகழ்ச்சி ஒரு தொடர்வினை போன்று நிகழ்வதால் போட்டான்கள் எலக்ட்ரான்கள் பாசிட்ரான்கள் பேரளவில் உற்பத்தி செய்யப்படுகின்றன. இதையே நாம் காஸ்மிக் கதிர்ப் பாறல் என்கிறோம்.

தரைமட்டத்தில் மெல்லிய காஸ்மிக் கதிர்களில் ஏராளமாகக் காணப்படும் எலக்ட்ரான்கள்—பாசிட்ரான்கள் இத்தகைய பாறல்



படம் 9·7
காஸ்மிக் கதிர்ப் பாறல்

களினால் கிடைக்கின்றன என்று கூறுவது மிகையாகாது. இயற்கையில் இத்தகையப் பாறலைத் தோற்றுவிப்பதற்கான ஆற்றலை முதல்நிலை எலக்ட்ரான் வளிமண்டலத்திலிருந்துதான் பெறுகின்றது. ஆய்வுக் கூடத்தில் குறிப்பிட்ட ஏதாவது திடப் பொருளை ஆற்றல் உட்கவரும் பொருளாகப் பயன்படுத்தி இந் நிகழ்ச்சியைத் தோற்றுவிக்கலாம்.

9·9. காஸ்மிக் கதிர்களின் தோற்றுவாய்

காஸ்மிக் கதிர்கள் கண்டுபிடிக்கப்பட்டு ஏறத்தாழ அரை நூற்றாண்டு ஆனபொழுதிலும் அவை எங்கு உருவாகின்றன என்பதும், அவை எவ்வாறு மிகுந்த ஆற்றலைப் பெறுகின்றன என்பதும் நமக்கு இன்னும் சரிவரப் புலனாகவில்லை. அவை புவியின் வளிமண்டலத்திற்குப் புறம்பேதான் உற்பத்தியாக வேண்டும் என்று மட்டுமே நாம் அறிகிறோம்.

முதலில் காஸ்மிக் கதிர்களானவை, பரிதியினின்று வெளியே பரவுகின்றன என்று நினைக்கப்பட்டது. ஆனால், பல காரணங்களை முன்னிட்டு இக் கதிர்களெல்லாம் சூரியனில் தோற்றுவிக்கப்படுவ தில்லை என்பது புலனாகின்றது. சூரியனில் இக் கதிர்கள் தோன் றினால், பகற்பொழுதில் இக் கதிர்களின் செறிவு அதிகமாகவும், இராக் காலங்களில் இச் செறிவு குறைந்தும் காணப்படவேண்டும். ஆனால், காஸ்மிக் கதிர்ச்செறிவு பகல் இரவு எல்லா நேரங் களிலும் ஓரளவிற்குச் சீராகவே உள்ளது என்பது சோதனை மூலம் கண்டறியப்பட்ட ஓர் உண்மை. இருப்பினும் காஸ்மிக் கதிர்களில் ஒரு சிறிய பகுதியாவது, சூரியனில் தோன்றவேண்டும் என்பதற்குப் போதிய சான்று உள்ளது. சூரியக் கொந்தளிப் பின் போதும், பகல் இரவு நேரங்களில் கிடைக்கும் கதிர்களின் செறிவிலுள்ள ஒரு சிறிய வேறுபாடும் இதனை வலியுறுத்து கின்றன.

தவிர, காஸ்மிக் கதிர்கள், சூரியனைத் தன்னிடத்தே கொண்டுள்ள 'பால்வழி' அண்டத்திலிருந்து (milkway) வரக் கூடும் என்று நினைக்கப்பட்டது. எவ்வாறு சூரியன், சில துகள் களை வெளியிடுகின்றதோ, அவ்வாறே மற்றச் சில விண்மீன்களும் சிற்சில துகள்களை வெளியிடக்கூடும் என்று கருத இடமிருக் கின்றது. காஸ்மிக் கதிரிலுள்ள துகள்கள் மிக்க ஆற்றலைக் கொண்டிருப்பதற்குக் காரணம், அவை வெளி அண்டங்களிலி ருந்து வருகின்றபொழுது மிகுந்த அளவில் முடுக்கம் பெறுவதே

எனலாம். ஆனால், காஸ்மிக் கதிரிலிருக்கும் கனமான அணுக் கருக்களின் எண்ணிக்கைக்கும் இலேசான கருக்களின் எண்ணிக் கைக்குமுள்ள விகிதத்திற்கும், பால்வழி அண்டத்திலுள்ள விண் மீன்கள்ல் இருக்கும் கனமான, இலேசான கதிர்களின் விகிதத் திற்கும் அதிக வேறுபாடு உள்ளதால், பல துகள்கள், சாதாரண அமைப்பைக்கொண்டுள்ள விண்மீன்களிலிருந்து வர முடியாது என்பது தெரிகின்றது. இவை, முற்றிலும் வேறுபட்ட 'சூபர் நோவே (super novae) என்கிற விண்மீன் குழுக்களிலிருந்து வரக்கூடும் என்று எண்ணப்படுகிறது. சூரியனைப் போன்று பன் மடங்கு நிறையுள்ள இவ் வகை விண்மீன்கள் அவற்றிலுள்ள ஹைட்ரஜன் வாயு தீர்ந்துவிட்டவுடனே திடீரென்று வெடிக் கின்றன. இவ் வெடிப்புகள் 'பால்வழி அண்டத்தில்' சுமார் 250 அல்லது 300 ஆண்டுகளுக்கு ஒரு முறையும், மற்ற அண்டங்களில் இன்னும் விரைவாகவும் நிகழ்கின்றன. ஒளி போன்ற மின் காந்தக் கதிரியக்கங்களும், அதிக ஆற்றல் படைத்த அணுக்கருக் களும், இத்தகைய விண் மீன்களிலிருந்துதான் தோன்றுகின்றன எனலாம். சூரியனிடமிருந்தும், பால்வழி அண்டத்திலுள்ள மற்ற விண்மீன்களிலிருந்தும் வெளியேறுகின்ற துகள்களின் ஆற்றல்களை விட, முதல்நிலைக் காஸ்மிக் கதிர்களில் கிடைக்கும் அதிக ஆற்றல் படைத்த துகள்களெல்லாம், இந்த 'சூபர்நோவே' விண்மீன்களிலி ருந்துதான் வருகின்றன என்று கருதப்படுகிறது. எனவே, அதிக நிறை கொண்ட துகள்கள் 'சூபர்நோவே' விண்மீன்களி லிருந்தும், குறைந்த நிறையுடைய துகள்கள் சூரியன் போன்ற விண்மீன்களிலிருந்தும் தோன்றுகின்றன என்று முடிவு செய்யலாம்.

காஸ்மிக் கதிர்களின் அதிக ஆற்றல்களைப் பின்வருமாறு விளக்கலாம். எவ்வாறு பீட்டாட்ரானில் துகள்கள் முடுக்கம் பெறுகின்றனவோ, அவ்வாறே காஸ்மிக் கதிரிலுள்ள துகள்களும் வெவ்வேறு அண்டங்களில் முடுக்கம் பெறலாம் என்று 'ஸ்வான்' (Swan) என்ற விஞ்ஞானி முடிவுசெய்தார். சில ஆண்டுகளுக்குப் பிறகு 'ஆல்ஃபெவன்' (Alfeven) என்ற விஞ்ஞானி அண்டத்தி லுள்ள விண்மீன்களுக்கிடையில் மிகுந்த செறிவுடைய காந்தப்புலங்கள் நிலவுகின்றன என்றும், இந்தக் காந்தப் புலங்கள் 'பிளாஸ்மா' (Plasma) மேகங்களில் குவிந்து கிடக்கின்றன என்றும், காஸ்மிக் கதிர்த்துகள்கள் இக் காந்தப் புலங்களினால்தான் முடுக்குவிக்கப்படுகின்றன எனவும் நினைத்தார்.

வினுக்கள்

1. காஸ்மிக் கதிர்கள் கண்டுபிடிக்கப்பட்ட விதத்தையும் அதன் பண்புகளையும் விளக்கு.

2. காஸ்மிக் கதிர்களைப், புவியின் காந்தப்புலம் எவ்வாறு பாதிக்கிறது என்பதைத் தெளிவாக விவரி.

3. காஸ்மிக் கதிர்களின் தோற்றுவாயைக் குறித்து ஒரு கட்டுரை வரைக.

10. இயற்பியல் துகள்கள்

10·1. இயற்பியல் துகள்கள் (Particles of Physies)

துகள் முடுக்கும் பொறிகள் நிறுவப்பட்ட பின்னர்ப் புதிய துகள்கள் அவை நிகழ்த்தும் இடையீட்டுச் செயல்கள் பற்றிய ஆராய்ச்சி மிக விரைவாக முன்னேறிக்கொண்டுவருகின்றது. இவ் வாராய்ச்சிகள், பொருள்பற்றியும், கதிர்வீச்சு பற்றியும் நன்கு அறிய வழிகோலுகின்றன. எனவே, இத் துகள்கள்பற்றியும் அவற்றின் இடையீட்டுச் செயல்கள் பற்றியும் தெரிந்துகொள்வது அவசியமாகிறது.

பொருள், கதிர்வீச்சு இவற்றின் கட்டமைப்பை விவரிக்க நான்கு வகைத் துகள்கள் தேவைப்படுகின்றன என்பதும், அவை நியூட்ரான், புரோட்டான், எலக்ட்ரான், ஃபோட்டான் என்பதும் தெரிந்ததே. இவற்றில் முதலாவதான நியூட்ரான் 1932 ஆம் ஆண்டில்தான் கண்டுபிடிக்கப்பட்டது. இவற்றைத் தவிர வேறு வகைத் துகள்களும் அண்டத்தில் (universe) இருக்கக்கூடுமென எதிர்பார்க்கப்பட்டது. அணுக்கரு β கதிர் வீச்சின் தொடர்ச்சி யான நிரலை விளக்கப் பவுலி யூகித்த 'நியூட்ரினோ' என்ற துகளும் இவற்றில் ஒன்றே. 1928ஆம் ஆண்டு டிராக் என்ற ஆங்கிலேய விஞ்ஞானி, மிகக் கடினமான கணக்கியல் வடிவத்தில் எலக்ட் ரானின் பண்புகளை விளக்குவதற்காகக் கொடுத்த கொள்கை விளக்கத்திலிருந்து, எலக்ட்ரானின் நிறைக்குச் சமமான, ஆனால் நேர்மின்னூட்டம் கொண்ட துகள் ஒன்று இருக்க வேண்டும் என்று முடிவு செய்யப்பட்டது. 1932ஆம் ஆண்டு ஆண்டர்சன் (Andersan) என்பவர் காஸ்மிக் கதிர்களைப்பற்றி ஆராய்ந்த பொழுது, இத் துகள் கண்டுபிடிக்கப்பட்டது. இது பாசிட்ரான் (Positron) அல்லது ஆன்டி எலக்ட்ரான் (anti electron) என்று அழைக்கப்பட்டது. இதைத் தவிர 1934ஆம் ஆண்டு ஐரீன், பிரெடிரிக் ஜோலியோ என்பவர்களால் சோதனைச் சாலையில் உற்பத்தி செய்யப்பட்ட கதிரியக்கப் பொருள்களால் உமிழப் படும் துகள்களில் இதுவும் ஒன்று என்று கண்டுபிடிக்கப் பட்டது.

எலக்ட்ரானின் எதிர்த் துகளான (antielectron) பாசிட்ரான் கண்டுபிடிக்கப்பட்டவுடன், முறையே புரோட்டான், நியூட்ரான் களின் எதிர்த்துகள்களான ஆன்டிபுரோட்டான்களும் ஆன்டி நியூட்ரான்களும் இருக்கக்கூடும் என்று எண்ணப்பட்டது. இத் துகள்களின் நிறைகள் பாசிட்ரான் நிறையைக் காட்டிலும் மிக அதிகமானதால் அவற்றின் தோற்றத்திற்கு அதிக அளவு ஆற்றல் தேவைப்படுவது இயற்கை. எனவே, இவற்றைக் கண்டுபிடிப்ப தற்குப் பில்லியன் எலக்ட்ரான் வோல்ட்டு அளவில் ஆற்றல் தேவைப்படும். எதிர்பாராத விதமாக காஸ்மிக் கதிர் வீச்சில் இத்தகைய ஆற்றல் கிடைப்பதால் காஸ்மிக் கதிர்களின் பண்பு களை அறிவதற்காகச் செய்யப்பட்ட சோதனை ஒன்றில்தான் முதன் முதலாக ஆன்டிபுரோட்டான் கண்டுபிடிக்கப்பட்டது எனலாம். இருப்பினும், அமெரிக்காவில் 'பெர்க்லி' (Berkely) என்ற இடத் தில் அமைந்துள்ள 6 பி. எ. வோ. கொடுக்கும் ஆற்றல் உள்ள பெவட்ரான் என்ற துகள்முடுக்கியின் உதவி கொண்டுதான் இந்த ஆன்டிபுரோட்டான் துகள் உண்டு என்பது உண்மைப் படுத்தப்பட்டது. இத் துகள் கண்டுபிடிக்கப்பட்ட மறு ஆண்டே ஆன்டி நியூட்ரான்களும் கண்டுபிடிக்கப்பட்டன. ஆன்டி நியூட்ரான், நியூட்ரானைப் போலவே மின்னூட்டமற்றிருப்பினும், இது ஒரு நியூட்ரானோடு சேர்ந்து தன்னைத்தானே அழித்துக் கொள்ளும் வன்மையுடையது.

மேற்கண்ட துகள்களைத் தவிர்த்து மற்றும் வேறு வகைத் துகள்களும் இருக்கலாம் என்று நினைக்கப்பட்டது. 1935ஆம் ஆண்டு யுகாவா (Yukawa) என்ற விஞ்ஞானி அணுக்கரு விசையை விளக்க மீசான்கள் என்ற துகள்கள், கருவினுள்ள புரோட்டான்கள் நியூட்ரான்கள் இடையே பரிமாற்றம் செய்யப் படலாம் என்று நினைத்தார். அவர் மீசானின் 'காம்டன்' அலை நீளம் ($\hbar/mc$) அணுவிசையின் நெடுக்கத்திற்கு ஏறத்தாழச் சமமாக இருக்கிறதென்று மெய்ப்பித்தார். ரூதர்போர்டின் α துகள் சிதறல் சோதனைமூலம் கருவிசையின் நெடுக்கம் 10^{-13} செ.மீ-க்கு ஏறத்தாழ இருந்ததால் இத் துகள்களின் நிறை எலக்ட்ரானின் நிறையைப் போன்று சுமார் 100-லிருந்து 300 மடங்கு இருக்கலாம் என்று முடிவுசெய்தார். இதன் பின்னரே இத் துகள்கள் 'மீசான்கள்' என்று அழைக்கப்பட்டன. (மீசான் என்பதற்கு இடைநிலை நிறையுடைய துகள் என்பது பொருள்.)

கடல்மட்டத்தில் எடுக்கப்பட்ட காஸ்மிக் கதிர் வீச்சின் முகிற்கலப் புகைப்படங்களிலிருந்துதான் இடைநிலை நிறையுடைய துகளுக்கான சான்று முதன்முதலாகக் கிடைத்தது எனலாம்.

இத் துகள் μ மீசோட்ரான், μ மீசான் அல்லது மியூவான் என்று அழைக்கப்பட்டது. இது எலக்ட்ரானைப் போல 206 8 மடங்கு நிறை (206 m_e) கொண்டது. நேர் மின்னூட்டம் கொண்ட மியூவான்களும் எதிர்மின்னூட்டம் கொண்ட மியூவான்களும் ($\mu\pm$) மட்டுமே காணப்படுகின்றன.

இரண்டாம் உலகப் போரின் காரணமாக இத் துகள்களின் பண்புகளை அறிவதற்கான சோதனைகள் தற்காலிகமாக நிறுத்தப் பட்டன எனினும், போரின் பின்னர் எதிர்ப்பாராத பல கண்டு பிடிப்புகள் இடம் பெற்றன. இக் கண்டுபிடிப்புகளில் ஒன்று 1947ஆம் ஆண்டு கான்வர்சி (Conversi), பான்சினி (Pancini), பிசியோனி (Piccioni) என்ற இத்தாலிய விஞ்ஞானிகள் நிகழ்த்திய சோதனையின் முடிவேயாகும். அவர்கள் மியூவான்கள் கரி அணுக் கருவினால் மெதுவாக ஈர்க்கப்படுகின்றன என்று கண்டனர். இது யுகாவா யூகித்த பண்புகளுக்கு முற்றிலும் மாறானதாக இருந்தது. இருப்பினும், அணுக்கரு விசையை விளக்க யுகாவா எண்ணிய துகள் மியூவான்களினின்றும் சற்றே மாறுபட்டதாக இருக்கவேண்டுமென்று நினைக்கப்பட்டது. அதே ஆண்டு பொவெல் (Powell), ஓஷியாலினி (Occhialini) லாட்டெஸ் (Lattes) என்ற விஞ்ஞானிகள் காஸ்மிக் கதிர்களின் பண்புகளை அறிவதற்காக நிகழ்த்திய சோதனைகளில் [அதிகக் குத்துயரங் களில் புகைப்படத் தகடுகளின்மீது காஸ்மிக் கதிர்கள் படுமாறு வைக்கப்பட்டன], எலக்ட்ரான் நிறையைப்போல் 273·2 மடங்கு நிறையுடைய மற்றும் ஒருவகைத் துகள்கள் இருப்பதாகக் கண்டுபிடித்தார்கள். இவை பை மீசான்கள் (π Mesons) அல்லது பையான்கள் (Pions) என்று அழைக்கப்பட்டன. இவை நியூக்லியான்களால் வெகு எளிதில் வெளியிடப்படுகின்றன அல்லது ஈர்க்கப்படுகின்றன. இவை நியூக்லியன்களால் ஈர்க்கப் படவில்லையென்றால் நியூட்ரினோவாகவும் மியூவானாகவும் சிதைவடைகின்றன. இவ்வாறு உற்பத்தியாகும் மியூவான்களும் செயலீடுகள் நிகழ்த்தக்கூடும்; அல்லது சிதைவடையக்கூடும். இருப்பினும், அவை வளிமண்டலத்தினுள் செல்வதற்குரிய அளவு அதிக வாழ்வுக்காலம் பெற்றிருப்பதால், கடல்மட்டத்தில் காஸ்மிக் கதிர்களின் கூறுகளாகத் தோற்றம் அடைகின்றன. அண்டத்தில் பையான்கள் π^+ என்ற நேர்மின்னூட்டம் கொண்ட துகள்களாகவும், π° என்ற மின்னூட்டமற்ற துகள்களாகவும், π° என்ற எதிர்மின்னூட்டம் கொண்ட துகள்களாகவும் திகழ் கின்றன. π° மீசான்கள் இரண்டு γ கதிர்களாகச் சிதைவுறு கின்றன.

பையான் கண்டுபிடிக்கப்படுவதற்கு முன்னதாகவே 1944ஆம் ஆண்டு லெ பிரின்ஸ் ரிங்குவே (Le Prince Ringuet) என்ற விஞ்ஞானி எலக்ட்ரான் நிறையைப் போல ஏறத்தாழ 1,000 மடங்கு நிறைகொண்ட வேறொரு துகளைக் கண்டுபிடித்தார். இது குமிழ்க்கலம் ஒன்றில் ஓர் எலக்ட்ரானும், மின்னூட்டம் கொண்ட ஒரு துகளும் மோதும்போது கிடைத்தது. இவ் வகைத் துகள்கள் கனமான மீசான்கள் (heavy mesons) என்று அழைக்கப்படு கின்றன. இவற்றில் சில V வடிவப் பாதைச் சுவடுகளைக் கொடுத்த தால் V துகள்கள் என்று அழைக்கப்பட்டன. இந்த V துகள்கள் 1947ஆம் ஆண்டு பட்லர், ராச்செஸ்டர் என்ற இரு விஞ்ஞானி களால் கண்டுபிடிக்கப்பட்டன. V துகள்கள் மின்னூட்டம் அற்றவை. இவற்றைத் தவிர மின்னூட்டமற்ற, ஆனல், எலக்ட் ரானைப் போல ஏறத்தாழ 2,200 மடங்கு நிறை கொண்ட மற்றொரு வகைத் துகள்கள் கண்டுபிடிக்கப்பட்டன. இவை நியூக்லியான் களைவிடக் கனமானவை.

மேற்கண்ட துகள்களெல்லாம் காஸ்மிக் கதிர்களைப் பற்றிய ஆராய்ச்சியினின்றும் கண்டுபிடிக்கப்பட்டவை. ஆனல், தற்போது துகள் முடுக்கிகளிலிருந்து இவற்றைப் போன்ற பல துகள்கள் கண்டுபிடிக்கப்பட்டுள்ளன. பெர்க்லியிலுள்ள 184" சிங்ரோ சைக்ளோட்ரானைக் கொண்டு புரோட்டான்களை முடுக்குவதன் மூலம் பையான்கள் தோற்றுவிக்கப்படுகின்றன. 3 பில்லியன் எலக்ட்ரான் வோல்ட்டு ப்ருக்ஹேவன் காஸ்மோட்ரான், 10 பி. எ. வோ. ருஷ்ய எந்திரம், 30 பி. எ. வோ. ப்ருக்ஹேவன் புரோட்டான் சிங்ரோட்ரான் போன்ற துகள்முடுக்கிகள் 1959,'60ஆம் ஆண்டுகளில் அமைக்கப்பட்டன. இவற்றைக்கொண்டு தற்போது மேற்கண்ட துகள்களைப் போன்ற பல துகள்களை அதிக அளவில் உற்பத்தி செய்ய முடிகின்றது. இவற்றின் பண்பு களை நன்கு அறிவதற்கு அண்மையில் கண்டுபிடிக்கப்பட்ட 'செரெங்கோ எண்ணி' (Cerenkov counter), குமிழ்க்கலம் (bubble chamber), பொறிக்கலம் (spark champer), போன்ற துகள் காட்டிகள் பெருமளவில் உதவி செய்கின்றன. மேலும், வெகு வேகமாகச் செயல்படும் கம்ப்யூட்டர்களின் துணைக்கொண்டு துகள்களின் பண்புகளை விரைவாகவும், துல்லியமாகவும் அறிய முடியும்.

10·2. துகள்கள் நிகழ்த்தும் இடையீட்டுச் செயல்கள் (Particle Interaction)

துகள்களிடை நிகழும் இடையீட்டுச் செயல்கள் அவை எவ்வாறு தோன்றுகின்றன என்றும், அவை எவ் வழியில் தேய்

கின்றன என்றும் அறிய உதவுகின்றன. தற்போது நான்கு வகை இடையீட்டுச் செயல்கள் உண்மைப்படுத்தப்பட்டிருக்கின்றன. அவையாவன :

(அ) வலிமைமிக்க இடையீட்டுச் செயல்கள்.
இவற்றின் இணைப்பு மாறிலி (coupling constant) ஏறத்தாழ 15-க்குச் சமமாக உள்ளது.

(ஆ) மின்காந்த இடையீட்டுச் செயல்கள்.
இவற்றின் இணைப்பு மாறிலி $\approx 1/137$.

(இ) மெல்லிய இடையீட்டுச் செயல்கள்.
இவற்றின் இணைப்பு மாறிலி $\approx 15 \times 10^{-14}$.

(ஈ) ஈர்ப்பு விசை இடையீட்டுச் செயல்கள்.
இவற்றின் இணைப்பு மாறிலி $\approx 15 \times 10^{-39}$.

வலிமைமிக்க இடையீட்டுச் செயலுக்கு, அணுக்கருவில் கருத் துகள்களைப் பிணைக்கும் கருவிசையையே ஓர் எடுத்துக் காட்டாகக் கூறலாம். இந்த இடையீட்டுச் செயல்களின் நெடுக்கம் சுமார் 2×10^{-13} செ.மீ. ஆக இருக்கலாம். நியூக்ளியான்—மீசான் சிதறலிலும், குறிப்பிட்ட சில துகள்கள் தேய்வுறும்போதும் இத்தகைய செயலீடுகள் நிகழ்கின்றன.

ஏறத்தாழ மின்னூட்டம் பெற்ற எல்லாத் துகள்களுமே மின் காந்த இடையீட்டுச் செயலுக்குட்பட்டவையே. இந்த இடை யீட்டுச் செயலின் நெடுக்கம் ஈறிலியாகும். இஃது ஃபோட்டான் மூலம் நிகழ்கின்றது. γ கதிரினின்றும் எலக்ட்ரான் பாசிட்ரான் இரட்டை உற்பத்தியாவது இந்த இடையீட்டுச் செயலின் காரண மாகவே எனலாம். மின்னூட்டமற்ற பையான் இரண்டு γ கதிர் களாகத் தேய்வுறுவதும் மின்காந்த இடையீட்டுச் செயலேயாம். அணுவின் மையத்திலுள்ள அணுக்கரு, வட்டப்பாதைகளில் சுற்றிக்கொண்டிருக்கும் எலக்ட்ரான்கள் ஆகியவற்றிடையே தொழிற்படும் ஈர்ப்பு விசையையும் இதற்கு மற்றோர் எடுத்துக் காட்டாகக் கூறலாம்.

மெல்லிய இடையீட்டுச் செயல்கள் மேற்கண்ட இடையீட்டுச் செயல்களைப் போன்று ஈர்ப்புவிசை ஒன்றைத் தோற்றுவிப்ப தில்லை. கதிரியக்கத் தனிமங்களின் β தேய்வை இதற்கு ஓர் எடுத்துக்காட்டாகக் கூறலாம். இதன் நெடுக்கம் மிகக் குறைவு [$< 10^{-10}$ செ. மீ.]. மெல்லிய இடையீட்டுச் செயலினால் தேய்

வுறும் துகள்களின் சராசரி வாழ்வுக் காலங்கள் 10^{-10} விநாடியிலிருந்து 10^{-8} விநாடிவரை உள்ளன.

எல்லா வகை இடையீட்டுச் செயல்களையும்விட, ஈர்ப்புவிசை இடையீட்டுச் செயல்தான் மிக மெலிவுற்றது எனலாம். இந்த இடையீட்டுச் செயலின் நெடுக்கம் ஈறிலியாகும். அதிக பரிமாண முள்ள பொருள்களின் இயக்கத்தை இவை பெருமளவில் பாதிக்கின்ற பொழுதிலும், கருத் துகள்களிடையே இச் செயலீட்டின் வலிமை மிக மிகக் குறைவே.

10·3. வலிமை மிக்க இடையீட்டுச் செயல்களை நிகழ்த்தும் துகள்கள் (Strongly Interacting Particles)

(அ) உற்பத்தி

ஏறத்தாழ ஒரு பில்லியன் எலக்ட்ரான் வோல்ட்டு ஆற்றலுடைய ஒரு புரோட்டான், அணுக்கரு ஒன்றுடன் மோதுகின்ற பொழுது வெவ்வேறு வகைத் துகள்கள் தோன்றுகின்றன. எடுத்துக்காட்டாகக் கீழ்க்கண்ட செயலீட்டைக் கூறலாம்.

$$p + p \longrightarrow p + n \pm \pi^{+} \qquad \ldots \quad (10{\cdot}1)$$

மேற்கண்ட செயலீட்டில் தோற்றுவிக்கப்படுகின்ற துகளின் நிறை, எறிதுகள், இலக்குத்துகள் ஆகியவற்றின் மொத்த நிறையைக் காட்டிலும் அதிகமாக உள்ளது. எனவே, இந்த நிறை வேறுபாடு எறிதுகளின் இயக்க ஆற்றலிலிருந்துதான் கிடைக்க வேண்டும். அதாவது, மேற்கண்ட செயலீடு நிகழவேண்டுமானல் ஒரு குறிப்பிட்ட 'பயன் தொடக்க ஆற்றல்' (theshold enegy) செயலீட்டிற்குக் கொடுக்கப்பட வேண்டும். அதாவது π^{+} மீசானைத் தோற்றுவிப்பதற்கு, குறைந்த அளவாக, 290 மி.எ.வோ ஆற்றலாவது செயலீட்டிற்குப் பயன்தொடக்க ஆற்றலாக அமையவேண்டும். நேர்மின்னூட்டம் கொண்ட பையான்கள் எதிர்மின்னுட்டம் கொண்ட பையான்கள், மின்னூட்டமற்ற பையான்கள் ஆகியவற்றை மிகுந்த ஆற்றலுடைய புரோட்டான்களை அணுக்கருக்களோடு மோதச் செய்து பெறலாம். இத் துகள் மறுபடியும் புரோட்டானுடன் மோதுகின்றபொழுது எலக்ட்ரான் நிறையைப்போல 2,183 மடங்கு நிறைகொண்ட (1,115 மி.எ.வோ.) 'Λ ஹைபெரான்' துகளும் 995 மடங்கு நிறைகொண்ட (498 மி. எ. வோ.) K° கன மீசானும் உற்பத்தி செய்யப்படுகின்றன. Λ ஹைபெரான் $1{\cdot}78 \times 10^{-10}$ விநாடி அரைவாழ்வுக் காலத்தையும், K° மீசான் $0{\cdot}62 \times 10^{-10}$ விநாடி அரைவாழ்வுக்

காலத்தையும் கொண்டிருக்கின்றன, இச் செயலீடுகளைக் கீழ்க் கண்ட சமன்பாடுகள் விளக்குகின்றன.

$$\pi^- + p \longrightarrow \Lambda + K^\circ \quad \dots \quad (10\cdot2)$$

$$\Lambda \longrightarrow p + \pi^- \quad \dots \quad (10\cdot3)$$

$$K^\circ \longrightarrow \pi^+ + \pi^- \quad \dots \quad (10\cdot4)$$

அடிப்படைத் துகள்களில் எலக்ட்ரான், மியூவான், நியூட்ரினோ ஃபோட்டான் ஆகியவற்றைத் தவிர்த்துப் பெரும்பாலானவை வலிமை மிக்க இடையீட்டுச் செயல்கள் நிகழ்த்தவல்லன. இவை இலேசாக இருப்பதால், அவை லெப்டான்கள் (Leptons) என்று அழைக்கப்படுகின்றன.

(ஆ) ஹாட்ரான் துகள்-பாரியான் எண் (Hadrons Baryan number)

வலிமைமிக்க இடையீட்டுச் செயல்கள் நிகழ்த்தும் துகள்கள் மூன்று வகைகளாகப் பிரிக்கப்பட்டுள்ளன.

1. மீசான்கள்,
2. பாரியான்கள்,
3. ஆன்டிபாரியான்கள்.

முதலில் மீசான் என்ற சொல் எலக்ட்ரான் நிறைக்கும் புரோட்டான் நிறைக்கும் இடைப்பட்ட நிறை கொண்ட துகளைக் குறிப்பதற்கே பயன்படுத்தப்பட்டது. இருப்பினும், தற்போது வலிமைமிக்க இடையீட்டுச் செயல்களை நிகழ்த்தும் துகள்களே மீசான்கள் எனப்படுகின்றன. மியூவன் என்ற துகள்கள் துகள் மோதலினால் உற்பத்தியாவதில்லை. கருக்களால் உட்கவரப்படுவதில்லை. எனவே, இவை தற்போது மீசான்கள் என்று அழைக்கப்படுவதில்லை.

'கனமான' எனப் பொருள்படும் 'பாரியான்' என்ற சொல் முதலில் புரோட்டான் நிறைக்குச் சமமான அல்லது அதிகமான நிறையைக்கொண்ட துகள்களைக் குறிப்பதற்கே பயன்பட்டு வந்தது. எனவேதான், புரோட்டானும் நியூட்ரானும் இலேசான பாரியான்களாக் குறிப்பிடப்பட்டுள்ளன. ஆயினும், η (1020) துகளும், η (1250) துகளும் புரோட்டான்களைக் காட்டிலும் அதிக நிறையுடையனவாய் இருந்தபோதிலும், அவை மீசான் என்று குறிப்பிடப்பட்டுள்ளன. இதற்கான விளக்கத்தைப் பின்வருமாறு கூறலாம்,

நியூட்ரானும் புரோட்டானும் அணுநிறை எண் $A = 1$ கொண்டவை. புரோட்டானைவிட இலேசான துகள்களான மீசான்கள், லெப்டான்கள், ஃபோட்டான்கள் ஆகியவற்றிற்கு $A = 0$ என்ற மதிப்பினை அளித்தால்

$$n \longrightarrow e^{+} + \gamma \qquad \ldots \quad (10{\cdot}5)$$

$$n + p \longrightarrow \pi^{+} + \pi^{0} \qquad \ldots \quad (10{\cdot}6)$$

போன்ற செயலீடுகள் நிகழ, புரோட்டான்களும் அணுக்கருக்களும் அழியாமல் நின்றுவிடும். அதாவது A-யின் மதிப்பு செயலீடுகளில் ஒரு மாறிலி எனக்கொண்டால் மேற்கண்ட சமன்பாடுகள் கொடுக்கும் செயலீடுகள் நிகழமுடியாது.

முதல் சமன்பாட்டில்

$$[\, n \longrightarrow -A = 1 \quad e^{+} = 0$$

$$\gamma = 0$$

இடப்பக்கம் $A = 1$. வலப்பக்கம் $A = 0$

இரண்டாம் சமன்பாட்டில்,

$n,\ A = 1$	$\pi^{+},\ A = 0$
$p,\ A = 1$	$\pi^{0},\ A = 0$
இடப்பக்கம் $A = 2$	வலப்பக்கம் $A = 0]$

இத்தகைய செயலீடுகளில் A என்பது 'பாரியான் எண்' **(Baryan number)** எனப்படுகின்றது. துகள் செயலீடுகளில் இந்தப் பாரியான் எண் மாறாது இருக்கவேண்டும். அப்போதுதான் இச் செயலீடுகள் நிகழ முடியும். மேற்கண்ட செயலீடுகளில் மின்னூட்டம், கோணஉந்தம், ஆற்றல், நேர்க்கோட்டு உந்தம் ஆகிய இவை மாறாது இருந்தபோதிலும், பாரியான் எண் A மாறுவதால் அவை நிகழாது தடுக்கப்படுகின்றன.

பாரியான் எண் மாறாக் கோட்பாட்டின்படி, ஒரு குறிப்பிட்ட துகள் நிகழ்த்தும் செயலீட்டிலிருந்து அதன் பாரியான் எண்ணைக் கண்டுபிடிக்கலாம். எடுத்துக்காட்டாக, கீழ்க்கண்ட செயலீட்டை (10·2) எடுத்துக்கொள்வோம்.

$$\pi^{-} + p \longrightarrow \Lambda + K^{0}$$

இதில் π^{-} துகள்களுக்கும், K^{0} துகளுக்கும் $A = 0$ என்று கொண்டால் புரோட்டானுக்கு $A = 1$ என ஆகிறது. ஆகையால் Λ துகளுக்கு $A = 1$ ஆக இருக்கவேண்டும், இவ்வாறு பாரியான்

எண் மாருத தன்மையைக் கொண்டு துகள்களின் தேய்வு வழி களைக் கண்டறியலாம்.

10·4. புதுமையான துகள்கள் (strange particles)

K மீசான்கள் ஹைபெரான்கள் ஆகியவற்றின் சில பண்புகள் விஞ்ஞானிகளை வியப்பில் ஆழ்த்தின. மேற்கண்ட துகள்கள் அதிக ஆற்றல் படைத்த செயலீடுகளால் தோற்றுவிக்கப்பட்டபோதிலும், அவை இணையாகவே தோன்றின. அதாவது ஒருவகைத் துகள் தோன்றியபொழுது மற்றொரு வகைத் துகளும் உமிழப்பட்டது. இது கேயான்கள் (Kayons) ஹைபெரான்களின் கூட்டு உற்பத்தி (associated production) என அழைக்கப்பட்டது இத் துகள்கள் புதுமையான துகள்கள் என்றும் அழைக்கப்பட்டன. தவிர, இவை வலிமைமிக்க இடையீட்டுச் செயல்களால் தோற்றுவிக்கப் படுவதால் இவை தேய்வுறுவதும் வலிமைமிக்க இடையீட்டுச் செயல்களின் மூலமாகத்தான் நடைபெறவேண்டும்; மேலும், இவை மிக விரைவில் தேய்வுற வேண்டும். ஆனல், எதிர்பார்த்ததற்கு மாருக இவை மிக நிதானமாகத் தேய்வுற்றன. இது மிகப் புதுமை யாக இருந்ததால் இவை புதுமையான துகள்கள் என்றழைக்கப் பட்டன. இத் துகள்கள் கீழ்க்கண்ட சமன்பாட்டின்படி வலிமை மிக்க இடையீட்டுச் செயல்களினுல் தோற்றுவிக்கப்படுகின்றன.

$$\pi^- + p \longrightarrow K^0 + \Lambda^0 \qquad \ldots \quad (10{\cdot}7)$$

மேலும், இவை கீழ்க்கண்ட மெல்லிய இடையீட்டுச் செயலினுல் தேய்வுறுகின்றன.

$$K^0 \longrightarrow \pi^+ + \pi^- \qquad \ldots \quad (10{\cdot}8)$$

$$\Lambda^0 \longrightarrow p + \pi^- \qquad \ldots \quad (10{\cdot}9)$$

புதுமையான துகள்களின் பண்புகளையொட்டி, இவற்றை கெல்மான் (Gellman) நிஷிஜிமா (Nishijima) என்ற இரு விஞ்ஞானிகள் தனித்தானியாகத் தொகுமுறை (Gellmans Nishijimaschemes) ஒன்றின்கீழ்க் கொண்டுவந்தனர். "புதுமைக் குவாண்டம் எண்" என்றதோர் எண்ணையும் (strange quantum number) புகுத்தினர். இது கீழ்க்கண்டவாறு வரையறுக்கப் படுகிறது.

$$S = 2\left(q - \tfrac{1}{2}A - t\right) \qquad \ldots \quad (10{\cdot}10)$$

இதில் q என்பது துகளின் மின்னூட்ட எண். இது எல்லா இடையீட்டுச் செயல்களிலும் மாருத எண்ணுக இருக்கிறது.

A என்பது துகளின் பாரியான் எண். $A = +1$ என்பது எல்லா பாரியான்களையும், $A = -1$ என்பது எல்லா ஆன்டி பாரியான்களையும் குறிக்கின்றன. மீசான்கள் பாரியான்கள் அல்லவாதலால் அவற்றின் பாரியான் எண் $A = 0$. 't' துகளின் 'ஐசோடோப்புத் தற்சுழற்சி (isotopic spin) அல்லது 'ஐசோ தற்சுழற்சி' (iso spin) ஆகும். நியூட்ரானும் புரோட்டானும் நியூக்ளியானின் இரண்டு நிலைகளே. புரோட்டானின் ஐசோ தற்சுழற்சி $= +\frac{1}{2}$. நியூட்ரானின் ஐசோ தற்சுழற்சி $= -\frac{1}{2}$. எனவே நியூக்ளியான்களைப் பொறுத்தவரையில் $q = \frac{1}{2} A + t$ என்பது பொருந்தும். Σ வகைத் துகள்களுக்கு $t = 1$. $t = +1$ என்பது Σ^+ துகளையும் $t = 0$ என்பது Σ^0 துகளையும் $t = -1$ என்பது Σ^- துகளையும் குறிக்கும். சமன்பாடு 10·10-லிருந்து பையான்களுக்கும் நியூக்லியான்களுக்கும் $S = 0$. கெல்மான், நிஷிஜிமா தொகுமுறை கீழ்க்கண்ட அட்டவணையில் கொடுக்கப்பட்டுள்ளது.

அட்டவணை (10—1)

புதுமைக் குவான்டம் எண்

ஐசோ தற்சுழற்சி	—2	—1	0	+1	+2
$t = 0$		Λ^0		$\bar{\Lambda}^0$	
$t = +\frac{1}{2}$	Ξ^0	$\bar{K}^0$	$(p, \bar{n})$	K^+	$\bar{\Xi}^+$
$t = -\frac{1}{2}$	Ξ^-	K^-	$(n, \bar{p})$	K^0	$\bar{\Xi}^0$
$t = +1$		Σ^+	π^+	$\bar{\Sigma}^+$	
$t = 0$		Σ^0	π^0	$\bar{\Sigma}^0$	
$t = -1$		Σ^-	π^-	$\bar{\Sigma}^-$	

இலேசான துகள்கள் லெப்டான்கள் என்றழைக்கப்பட்டன என்று முன்பே பார்த்தோம். மியூவான், எலெக்ட்ரான் நியூட்ரினோ ஆகிய துகள்கள் லெப்டான்களாகும். இவை $S = \frac{1}{2}$ தற்சுழற்சி கொண்டுள்ளன. இவற்றின் பாரியான் எண் $A = 0$. இவ்

வகைத் துகள்கள் γ கதிர்கள் சிதைவுறுவதாலும், வலிமைமிக்க செயலீடுகள் நிகழ்த்தக்கூடிய சில துகள்கள் சிதைவுறுவதாலும் தோற்றுவிக்கப்படுகின்றன. β கதிரியக்கத்தில்

$$n \longrightarrow p + e^- + \nu^- \qquad \ldots \quad (10{\cdot}11)$$

$$p \longrightarrow n + e^+ + \nu \qquad \ldots \quad (10{\cdot}12)$$

என்ற நிகழ்ச்சிகள் நடைபெறுகின்றன என்று பார்த்தோம். இத் தேய்வும் லெப்டான்களைத் தோற்றுவிக்கின்றன.

லெப்டான்கள் ஹாட்ரான்களைப் போலல்லாமல் மெல்லிய இடையீட்டுச் செயல்களைக் கொண்டவை. மின்னூட்டம் பெற்ற லெப்டான்கள் மெல்லிய இடையீட்டுச் செயல்களுடன், மின்காந்த இடையீட்டுச் செயல்களும் கொண்டவை. லெப்டான்களை விவரிக்கும் மெல்லிய இடையீட்டுச் செயல்களில் 'வெளி எதிரொளிப்பின்' (parity) மாருத தன்மை அழிந்துவிடுகிறது.

இயற்பியலில் நாம் இதுகாறும் கண்ணுற்ற துகள்களின் பண்புகளையும் அவை நிகழ்த்தும் இடையீட்டுச் செயல்களையும் பார்த்தோம். பொருளின் ஆக்கத்திற்குத் தேவையான அடிப்படைத் துகளின் அமைப்பு என்ன என்பது இன்னும் சரிவரத் தெரியவில்லை. இந்தத் துகள்களெல்லாம் 'குவார்க்' (quark) என்னும் மிகச் சிறிய துகள்களைக் கொண்டு தோற்றுவிக்கப்பட்டவை என்று கருத இடமிருக்கிறது. இயற்பியல் துகள்களைப் பற்றிய ஆராய்ச்சி வெவ்வேறு சோதனைச் சாலைகளில் தொடர்ந்து நடைபெற்றுக் கொண்டிருக்கின்றன. எதிர்பாராத பண்புகளைக் கொண்ட துகள்கள் காணப்படலாம் என்று எதிர்ப்பார்க்கப்படுகிறது. எனவே, இயற்பியல் துகள்களைப் பற்றிய ஆராய்ச்சி ஒரு "தொடர்கதை"யாகவே இருக்கும் என்று கருதவேண்டியிருக்கிறது.

வினாக்கள்

1. இயற்பியல் துகள்களைப்பற்றி ஒரு கட்டுரை வரைக.

2. பின்வருவனவற்றைப் பற்றி குறிப்பு வரைக.

   (அ) துகள் இடையீட்டுச் செயல்கள்

   (ஆ) புதுமைத் துகள்கள்

   (இ) பாரியான்கள்

   (ஈ) ஹைபெரான்கள்

பிற்சேர்க்கை 1

பயன்படக்கூடிய இயற்பியல் மாறிலிகள்

Useful physical constants

வரிசை எண்	மாறிலி	சென்டி மீட்டர்-கிராம்-விநாடி முறையில் (C.G.S, Units)	மீட்டர்-கிலோகிராம்-விநாடி-ஆம்பியர் அலகுகளில்
1.	வெற்றிடத்தில் ஒளியின் திசைவேகம்	$2{\cdot}99792\times10^{10}$ செ மீ./விநாடி	$2{\cdot}99792\times10^{8}$ மீட்டர்/விநாடி ($\sim3{\cdot}0\times10^{8}$ மீட்டர்/விநாடி)
2.	பிளாங்கின் மாறிலி	$6{\cdot}62559\times10^{-27}$ எர்கு விநாடி	$6{\cdot}62559\times10^{-34}$ ஜூல் விநாடி ($\sim6{\cdot}63\times10^{-34}$ ஜூல் விநாடி
3.	எலக்ட்ரான் மின்னூட்டம்	$4{\cdot}80298\times10^{-10}$ நிலைமின் அலகு $=1{\cdot}602\times10^{-20}$ மின்காந்த அலகு	$1{\cdot}602\times10^{-19}$C
4.	எலக்ட்ரான் அமைதிநிலை நிறை	$9{\cdot}10908\times10^{-28}$ கிராம் $=0{\cdot}511$ மில்லியன் எலக்ட்ரான் வோல்ட்	$\sim9{\cdot}11\times10^{-31}$ கிலோ கிராம். $=0{\cdot}511$ மி. எ. வோ.
5.	அணுநிறை அலகு = கரியின் அணுநிறையில் 12-ல் ஒரு பாகம் = ^{1}/அவகாட்ரோ எண்	$1{\cdot}6604\times10^{-24}$ கிராம் $=931$ மி. எ. வோ.	$1{\cdot}6604\times10^{-27}$ கிலோ கிராம் $=931$ மி. எ. வோ.
6.	அவகாட்ரோ எண் ($C^{12}=12$)	$6{\cdot}023\times10^{-23}$ (மோல்)$^{-1}$	$6{\cdot}023\times10^{-26}$ (கி. மோல்)$^{-1}$
7.	பாரடே எண்	$9{\cdot}649\times10^{3}$ (மின்காந்த அலகு) (மோல்)$^{-1}$	$9{\cdot}649\times10^{4}$ (C மோல்)$^{-1}$
8.	புரோட்டானின் அமைதிநிலை நிறை	$1{\cdot}673\times10^{-24}$ கிராம் $=938{\cdot}3$ மி. எ. வோ.	$1{\cdot}673\times10^{-27}$ கிலோ கிராம் $=938{\cdot}3$ மி. எ. வோ.

9.	நியூட்ரானின் அமைதிநிலை நிறை	$1{\cdot}675 \times 10^{-24}$ கிராம் = 939·3 மி. எ. வோ.	$1{\cdot}675 \times 10^{-27}$ கிலோ கிராம் = 939·3 மி. எ. வோ.
10.	புரோட்டான் நிறைக்கும் எலக்ட்ரான் நிறைக்கும் உள்ள தகவு	1836	1836
11.	எலக்ட்ரானின் மின்னூட்டத்திற்கும் நிறைக்குமுள்ள தகவு	$1{\cdot}760 \times 10^{7}$ மி. கா. அ./கிராம்	$1{\cdot}760 \times 10^{11}$ C/கிலோ கிராம்
12.	போர் வட்டப்பாதை ஆரம்	$5{\cdot}29 \times 10^{-9}$ செ. மீ.	$5{\cdot}29 \times 10^{-11}$ மீ.
13.	ரிட்பெர்க்கின் மாறிலி	109737·3 செ. மீ.$^{-1}$	$\sim 1{\cdot}097 \times 10^{7}$ மீ.$^{-1}$
14.	பண்டைய எலக்ட்ரான் ஆரம்	$2{\cdot}28 \times 10 \times^{-13}$ செ. மீ.	$2{\cdot}82 \times 10^{-15}$ மீ.
15.	எலக்ட்ரானின் காம்ப்டன் அலைநீளம்	$2{\cdot}426 \times 10^{-10}$ செ. மீ.	$2{\cdot}426 \times 10^{-12}$ மீட்டர்
16.	மீநுண் வரியமைப்பு மாறிலி	$1/137{\cdot}0390 = 7{\cdot}297 \times 10^{-3}$	$1/137{\cdot}0390$
17.	போல்ட்ஸ்மன் மாறிலி	$1{\cdot}38 \times 10^{-16}$ எர்கு கெல்வின்$^{-1}$	$1{\cdot}38 \times 10^{-23}$ ஜூல் கெல்வின்$^{-1}$
18.	வாயு மாறிலி	$8{\cdot}31 \times 10^{7}$ எர்கு கெல்வின்$^{-1}$	$8{\cdot}31 \times 10^{3}$ ஜூல் கெல்வின்$^{-1}$ (கி. மோல்)$^{-1}$
19.	ஈர்ப்பு மாறிலி	$6{\cdot}67 \times 10^{-8}$ டைன் (செ. மீ.)^{2} (கிராம்)$^{-2}$	$6{\cdot}67 \times 10^{-11}$ நியூட்டன் மீ. 2 (கிலோ கிராம்)$^{-2}$
20.	படித்தர வெப்பநிலை அழுத்தத்தில் ஒரு மோல் வாயுவின் கன பரிமாணம்	$2{\cdot}24 \times 10^{4}$ (செ. மீ.)^{2} (மோல்)$^{-1}$	22·40 மீட்டர்^{2} (கி. மோல்)$^{-1}$

பிற்சேர்க்கை 2

பயன்படக்கூடிய அலகுமாற்றுக் குணகங்கள்
(Useful conversion factors)

ஓர் அலகுமாற்று குணகமென்பது ஓர் அலகு முறையிலிருந்து மற்றோர் அலகுமுறைக்கு மாற்றம் செய்யத் தேவையான பரிமாணமுள்ள ஒரு விகிதம். சில அலகு மாற்றுக் குணகங்கள் கீழே கொடுக்கப் பட்டுள்ளன.

எண்	இயற்பியல் அளவீடு	அளவிடப்பட்ட அலகு முறை	மாற்றம் செய்யவேண்டிய அலகுமுறை	பெருக்கவேண்டிய அளவு
1.	நீளம்	செ. மீ.	மீட்டர்	10^{-2}
		ஆங்ஸ்ட்ராம் Å	சென்டி மீட்டர்	10^{-8}
		ஃபெர்மி	மீட்டர் m	10^{-15}
2.	நேரம்	நாள்	விநாடி	$8\ 64 \times 10^{4}$
		ஆண்டு	விநாடி	$3{\cdot}1536 \times 10^{7}$
3.	அதிர்வெண்	சைகிள்/விநாடி	ஹெர்ட்ஸ் Hz	1
4.	நிறை	கிராம்,	கிலோ கிராம்	10^{-3}
		அ. நி. அ.	கிலோ கிராம்	$1{\cdot}6004 \times 10^{-27}$
5.	விசை	டைன்	நியூட்டன்	10^{-5}
6.	ஆற்றல்	எர்கு/விநாடி	ஜூல்	10^{-7}
		எலக்ட்ரான் வோல்ட்டு	எர்கு	$1{\cdot}6021 \times 10^{-12}$
		கிலோவாட் மணி	எர்கு	$3{\cdot}6 \times 90^{13}$

7.	திறன்	எர்கு/விநாடி காலரி/விநாடி	வாட் (W) வாட் (W)	10^{-7} $3{\cdot}6 \times 10^{13}$
8.	மின்னூட்டம்	நிலைம கூலும் (நிலைமின் அலகு) தனி கூலும் (மின்காந்த அலகு)	கூலும் C கூலும் C	$\frac{1}{3} \times 10^{9}$ 10
9.	மின்னழுத்த வேறுபாடு	நிலைம கூலும் (நி.மி.அ.) தனிகூலும் (மி.கா.அ)	வோல்ட்டு V வோல்ட்டு V	300 10^{-8}
10.	மின்தேக்கு திறன்	நிலைம ஃபாரட் (நி.மி.அ.) தனி ஃபாரட் (மி.கா.அ.)	ஃபாரட் F ஃபாரட் F	$\frac{1}{9} \times 10^{-11}$ 10^{9}
11.	மின்புலச் செறிவு	வோல்ட்டு/செ.மீ.	வோல்ட்டு/மீட்டர்	10^{2}
12.	காந்தப்புலச் செறிவு	ஆம்பியர்/செ.மீ.	ஆம்பியர்/மீட்டர்	10^{2}
13.	மின்னோட்டம்	நிலைம ஆம்பியர்(நி.மி.அ.) தனி ஆம்பியர்(மி.கா.அ.)	ஆம்பியர் A ஆம்பியர் A	$\frac{1}{3} \times 10^{-9}$ 10
14.	மின்தடை	நிலைம ஓம் (நி. மி. அ.) தனி ஓம் (மி. கா. அ)	ஓம் Ω ஓம் Ω	9×10^{11} 10^{-9}
15.	மின் தூண்டல்	நிலைமஹென்ரி (நி.மி.அ.) தனிஹென்ரி (மி.கா.அ.)	ஹென்ரி H ஹென்ரி H	9×10^{11} 10^{-9}

பிற்சேர்க்கை 3

பொருள்களின் திசைவேகத்தைப் பொறுத்த நிறைமாற்றம்

(2·5) படத்தில் காணப்படும் இரண்டு ஆயக் கட்டங்களில் இரண்டாவது கட்டத்தில், X' அச்சுக்கு இணையாக m' நிறை கொண்ட முறையே u', $(-u')$ திசைவேகங்கள் கொண்ட இரண்டு பொருள்கள் மோதுவதாகக் கற்பனை செய்வோம். இம் மோதலுக்குப் பின்னர் இரண்டும் ஒன்றுசேர்ந்து $2m'$ நிறை கொண்டு இயங்குவதாகக் கொள்வோம். உந்தம் மாருக் கோட்பாட்டின்படி

$$m'u' - m'u' = 2m' Vr \qquad \dots \quad (பி. 3·1)$$

இதில் Vr என்பது இரண்டு பொருள்களின் சார்புத் திசை வேகம். இது (பி. 3·1) சமன்பாட்டின்படி சுழியாகின்றது. எனவே, மோதலுக்குப்பின் இரண்டாவது ஆயக் கட்டத்தில் இரண்டு பொருள்களும் அமைதி நிலையில் உள்ளன. இந்த ஆயக் கட்டம் முதல் ஆயக் கட்டத்தைப் பொறுத்து 'v' திசைவேகத் தோடு இயங்கினல் ஒன்ருன இரு பொருள்களும் முதலாவது ஆயக் கட்டத்தில் v திசைவேகத்துடன் தான் செல்லும். முதலாவது ஆயக்கட்டத்தின் u_1, u_2 திசைவேகங்கள் கீழே கொடுக்கப் பட்டுள்ளன:

$$\left.\begin{aligned} u_1 &= \frac{u'+v}{1+\dfrac{u'v}{c^2}} \\ u_2 &= \frac{-u'+v}{1-\dfrac{u'v}{c^2}} \end{aligned}\right\} \qquad \dots \quad (பி. 3·2)$$

முதலாவது ஆயக் கட்டத்தில் இயங்குகின்ற பொருள்களின் நிறைகள் m_1, m_2 என்றிருக்குமாளுல், உந்தம் மாருக் கோட் பாட்டின்படி

$$m_1 u_1 + m_2 u_2 = (m_1 + m_2)v$$

$$\frac{m_1}{m_2} u_1 + u_2 = \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) v$$

அல்லது

$$\frac{m_1}{m_2}\left(u_1 - v\right) = v - u_2$$

சமன்பாடு (பி. 3·2)ஐப் பயன்படுத்திளுல்,

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{v-u_2}{u_1-v} = \frac{1+\dfrac{u'v}{c^2}}{1-\dfrac{u'v}{c^2}} \qquad \dots \quad (பி. 3·3)$$

தவிரவும், சமன்பாடு (பி. 3·2)ஐப் பின்வருமாறும் எழுதலாம்.

$$u_1 + \frac{u_1 u' v}{c^2} = v + u'$$

$$u_2 - \frac{u_2 \, u' \, v}{c^2} = v - u_2$$

இருமடி கண்டு, ஒன்றிலிருந்து மற்றொன்றைக் கழித்துத் தொடர்களை வரிசைப்படுத்தினால்

$$\left(\frac{u'v}{c^2}\right)^2 - 2\left(\frac{2c^2 - u_1^2 - u_2^2}{(u_1^2 - u_2^2)}\right)\left(\frac{u'v}{c^2}\right) + 1 = 0.$$

இது $\left(\frac{u'v}{c^2}\right)$-ல் இரண்டாம் மடிச் சமன்பாடு ; எனவே,

$$\frac{u'v}{c^2} = \frac{(2c^2 - u_1^2 - u_2^2) - 2[(c^2 - u_1^2)(c^2 - u_2^2)]^{-\frac{1}{2}}}{u_1^2 - u_2^2}$$

இதை (பி. 3·3)-ல் சரியீடு செய்தால்

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{(1 - u_2^2/c^2)^{\frac{1}{2}}}{(1 - u_1^2/c^2)^{\frac{1}{2}}}$$

என்பது கிடைக்கும்.

இப்பொழுது இரண்டாவது பொருளானது முதல் ஆயக் கட்டத்தில் மோதுவதற்குமுன் சுழி நிறைகொண்டு இயங்குமானால்

$$m_1 = \frac{m_2}{1 - \frac{u_1^2}{c^2}} \qquad \ldots \quad (பி. 3·4)$$

என ஆகும்.

இப்பொழுது ஒரே நிறை கொண்ட இரு பொருள்கள் ஒரே திசைவேகத்துடன் இயங்குமேயானால் சமன்பாடு (பி. 3·4) -லிருந்து u_1 திசைவேகத்தோடு இயங்குகிற பொருள்களின் நிறை m_1 எனவும், திசைவேகம் சுழியாக இருக்கும்போது அதன் நிறை (அமைதிநிலை நிறை) $m_2 = m_0$ எனவும் கொண்டால்

$$m = \frac{m_0}{\left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}}} \qquad \ldots \quad (பி. 3·5)$$

என்பது கிடைக்கும். இச் சமன்பாடு பொருளின் நிறை எவ்வாறு அதன் திசைவேகத்தைப் பொறுத்து மாறுகிறது என்பதை விளக்குகிறது.

பிற்சேர்க்கை 4

அடிப்படைத் துகள்கள்

		துகள்	குறியீடு	நிறை (m_e அலகுகளில்)	மின் ஊட்டம்	தற்சுழற்சி	சராசரி வாழ்வுக் காலம் (வினாடிகளில்)	ஆன்டித் துகள்
போசான்கள்	புலத்துகள்கள்	கிராவிடான்	g	0	0	2	நிலையானது	g
		ஃபோட்டான்	γ	0	0	1	நிலையானது	γ
		W-போசான்	w	>4000	± 1	1	—	$\mp w$
ஃபெர்மியான்கள்	லெப்டான்கள்	நியூட்ரினோ	ν	0	0	$\frac{1}{2}$	நிலையானது	$\bar{\nu}$ (ஆன்டி நியூட்ரினோ)
		எலக்ட்ரான்	e^-	1	$-e$	$\frac{1}{2}$	நிலையானது	e^+ (பாசிட்ரான்)
		மியு எதிர் (Mu minus)	μ^-	$206{\cdot}77 + 0{\cdot}002$	$-e$	$\frac{1}{2}$	$2{\cdot}212 \pm 0{\cdot}001 \times 10^{-6}$	μ^+

போசான்கள்	மீசான்கள்	பை சுழி (Pi zero)	π^0	$264 \cdot 2 \pm 0 \cdot 1$	0	0	$(2 \cdot 2 \pm 0 \cdot 8) \times 10^{-16}$	π^0
		பை நேர் (Pi plus)	π^+	$273 \cdot 2 \pm 0 \cdot 1$	$+e$	0	$(2 \cdot 55 \pm 0 \cdot 03) \times 10^{-8}$	π^-
		K நேர் (K plus)	k^+	$966 \cdot 6 \pm 0 \cdot 4$	$+e$	0	$(1 \cdot 224 \pm 0 \cdot 013) \times 10^{-8}$	k^-
		K சுழி (K zero)	k^0	974 ± 1	0	0	$K_1{}^0 : (1 \cdot 00 \pm 0 \cdot 04) \times 10^{-10}$ $K_2{}^0 : (6 \cdot 1 \pm 1 \cdot 4) 10^{-8}$	$\bar{k}_0$
	நியூக்லியான்கள்	புரோட்டான்	p	$1836 \cdot 12 \pm 0 \cdot 02$	$+e$	$\frac{1}{2}$	நிலையானது	$\bar{p}$ (ஆன்டி புரோட்டான்)
		நியூட்ரான்	n	$1838 \cdot 65 \pm 0 \cdot 02$	0	$\frac{1}{2}$	$(1 \cdot 01 \pm 0 \cdot 03) 10^3$	$\bar{n}$ (ஆன்டி நியூட்ரான்)
		லாம்டா	λ^0	$2182 \cdot 8 \pm 0 \cdot 3$	0	$\frac{1}{2}$	$(2 \cdot 51 \pm 0 \cdot 09) \times 10^{-10}$	$\bar{\Lambda}^0$(ஆன்டி லாம்டா)
		சிக்மா நேர்	Σ^+	$2327 \cdot 7 \pm 0 \cdot 4$	e	$\frac{1}{2}$	$(0\ 81 \pm 0 \cdot 06) \times 10^{-10}$	$\bar{\Sigma}^-$(ஆன்டி சிக்மா எதிர்)
		சிக்மா சுழி	Σ^0	$2331 \cdot 8 \pm 1 \cdot 0$	0	$\frac{1}{2}$	10^{-11}-க்குக் குறைவானது	$\bar{\Sigma}^0$(ஆன்டி சிக்மா சுழி)
		சிக்மா எதிர்	Σ^-	$2340 \cdot 5 \pm 0 \cdot 6$	$-e$	$\frac{1}{2}$	$(1 \cdot 61 \pm 0\ 10) \times 10^{-10}$	$\bar{\Sigma}^+$(ஆன்டி சிக்மா நேர்)
		(க்)சை சுழி	Ξ^0	2565 ± 8	0	$\frac{1}{2}$	தோராயமாக 10^{-10}	$\bar{\Xi}^0$[ஆன்டி (க்)சை சுழி]
		(க்)சை எதிர்	Ξ^-	2580 ± 2	$-e$	$\frac{1}{2}$	$(1 \cdot 3 \pm 0 \cdot 4) \times 10^{-10}$	$\bar{\Xi}^+$[ஆன்டி (க்)சை நேர்]

மேற்கோள் நூற்பட்டியல்

(BIBLIOGRAPHY)

1. Moh, N. F.—*Elements of Wave Mechanics*, Oxford University Press.

2. Pauling, L. and William, E. B.—*Introduction to Quantum Mechanics.*

3. French, A. P.—*Special Relativity.*

4. Alfred T. Goble and David, K. Baker—*Elements of Modern Physics.*

5. Semat—*Atomic and Nuclear Physics.*

6. Sprouel—*Modern Physics.*

7. Oldenberg, O.—*Introduction to Atomic Physics*, McGraw Hill Book Company.

8. Max Born — *Atomic Physics*, Blackie and Sons Ltd.

9. Mahesh — *Atomic Physics*, R. Chand and Company, New Delhi.

10. Sehgal, Chopra and Sehgal — *Modern Physics*, Sultan Chand & Co.

11. Harvey, B. G. — *Introduction to Nuclear Physics and Chemistry*, Prentice Hall of India.

12. Little Field, T. A. and Thorley, N. — *Atomic and Nuclear Physics*, Von Nostrand Company, E.L.B.S. Edition.

13. Halliday, D. — *Introductory Nuclear Physics*, Asia Publishing House, Bombay.

14. Price, W. J. — *Nuclear Radiation Detectors*, McGraw Hill Book Company, New York.

15. Russi, B.—*High Energy Particles*, Prentice Hall Inc., New York.

கலைச்சொற்கள்

அ

அம்மீட்டர் — Ammeter
அயனி — Ion
அயனிக்கலம் — Ionisation chamber
அயனி இரட்டை — Ion pair
அணு — Atom
அணு ஆற்றல் — Atomic energy
அணுஉலை — Atomic reactor
அணுநிறை — Atomic mass
அணு அமைப்பு — Atomic model
அணுநிறை எண் — Atomic mass number
அணு எண் — Atomic number
அணுக்கருச் செயலீடுகள் — Nuclear reactions
அணுக்கருப் பிணைவு — Nuclear fusion
அணுக்கருப் பிளவு — Nuclear fission
அணுக்கருச் சிதைவு — Nuclear decay
அவகாட்ரோ எண் — Avagadro number
அச்சு—பெருமம் — Major axis
,, —சிறுமம் — Minor axis
அழிவின்மை விதி — Conservation Law
—உந்தம் — (Conservation of) momentum
—ஆற்றல் — (Conservation of) energy
—நியூக்ளியான்கள் — (Conservation of) nucleons
—மின்னூட்டம் — (Conservation of) charge
—நிறை ஆற்றல் — (Conservation of) man-energy
அரிதிற் கடத்தி — Bad conductor
அரைவாழ்வுக் காலம் — Half life period
அலைப் பெட்டகம் — Wave packet
அலைச் சார்பு — Wave function
அதிர்வெண் — Frequency
அண்டம் — Universe
அடிநிலை — Ground state

அமைதிநிலை — Rest
அமைதிநிலை நிறை — Rest mass

ஆ

ஆல்ஃபா — α
ஆல்ஃபாத் துகள் — α-particle
ஆல்ஃபாக் கதிர்கள் — α-rays
ஆல்ஃபாக் கதிர் வெளியீடு — α-rays emission
ஆல்ஃபாக் கதிர் நெடுக்கம் — Range of an α-particle
ஆங்ஸ்ட்ராம் அலகு — Angstrom unit
ஆற்றல்-வெப்பக் கரு — Thermo nuclear energy
ஆற்றல் நிரல் — Energy spectrum
ஆற்றல் மட்டம் — Energy level
ஆற்றல் வெளியிடும் செயலீடுகள் — Exoergic reactions
ஆற்றல் உட்கவர் செயலீடுகள் — Endoergic reactions
ஆன்டி துகள் — Antiparticle
ஆன்டி எலக்ட்ரான் — Anti electron
ஆன்டி நியூட்ரான் — Anti nuetron
ஆன்டி பாரியான் — Anti baryon

இ

இலக்குக் கரு — Target nucleus
இலட்சிய வாயுச் சமன்பாடு — Ideal gas equation
இரட்டைப் பண்பு — Dual nature
இரட்டையர் புதிர் — Twin paradox
இயக்க ஆற்றல் — Kinetic energy
இணைமாற்றுத் தத்துவம் — Principle of Equivalance
இணை உற்பத்தி — Pair production
இடையீட்டுச் செயல் — Interaction

ஈ

ஈர்ப்பு — Gravitation
ஈர்ப்புப் புலம் — Gravitational field
ஈர்ப்பு விசை — Gravitational force
ஈர்ப்பு நிறை — Gravitational mass
ஈறிணைத் தீர்வு — Asymptotic solution
ஈதர் — Ether

உ

உட்கவர்தல் — Absorption
உட்கவர் பட்டைகள் — Absorption (spectral) bands

உந்தம்—நேர்கோட்டு — Linear momentum
,, —கோண — Angular momentum
உறுதிநிலை — Stability
உறுதியிலாத் தன்மை — Instability
உறுதிப்பாடிலாமைக் கோட்பாடு — Indeterminacy Principle
உண்மை எண் — Real number
உடன் நிகழ்வு — Simultaneity

ஊ

ஊடகம் — Medium
ஊடுருவும் தொலைவு — Range of penetration

எ

எடுகோள் — Postulate
என்ட்ரோபி — Entropy
எண்ணி-தொலைநோக்கி — Counter-telescope
எதிர்த் துகள் — Anti particle
எதிர் மின்வாய் — Cathode
எதிரொளிப்பு — Reflection
எலக்ட்ரான் வில்லை — Electron lens
எலக்ட்ரான் நுண்ணோக்கி — Electron telescope
எலக்ட்ரான் உட்கவர்ச்சி — Electron absorption
எமனேஷன் — Emanation

ஐ

ஐன்ஸ்டீன் — Einstein
ஐசோடோப்பு — Isotope
ஐசோமெரிக் — Isomeric
ஐகென் மதிப்புகள் — Eigen values
ஐயப்பாட்டுக் கொள்கை — Uncertainty Principle

ஒ

ஒருவழிச் சவ்வு — Semi-permeable membrane
ஒளிர்வு, ஒளிர்தல் — Flourescence
ஒளிமின் விளைவு — Photo-electric effect
ஒளிமின் பெருக்கி — Photo-multipliers
ஒத்ததிர்வு — Resonance
ஒப்புச் செயலூக்கம் — Specific activity

க

கதிரியக்கம்—இயற்கை	—	Natural radiation
,, —செயற்கை	—	Artificial radiation
,, —தேய்வு விதி	—	Radioactive decay law
,, —ஐசோடோப்பு	—	Radioactive isotope
,, —காட்டிகள்	—	Detectors of radiation
,, —தொடர்	—	Radioactive series
கருவிசை	—	Nuclear force
கருப்பிணைவு	—	Nuclear fusion
கருப்பிளவு	—	Nuclear fission
கற்றை	—	Beam
கட்டத் திசைவேகம்	—	Phase-velocity
கட்ட நிலைப்பாடு	—	Phase stability
கட்ட வேறுபாடு	—	Phase difference
கணிப்பு வீதம்	—	Counting-rate
கடினக் கூறு	—	Hard component
காக்ராப்ட் வால்டன் மின்னழுத்தப் பெருக்கி	—	Cockroft-Walton Voltage multiplier
காஸ்மிக் கதிர்	—	Cosmic rays
காஸ்மிக் கதிர்ப்பாறல்	—	Cosmic ray showers
காம்டன் விளைவு	—	Compton effect
காமாக் கதிர்கள்	—	γ - rays
காட்டிகள்	—	Detectors
காந்த ஒத்ததிர்வு	—	Magnetic resonance
காந்தப்புலம்	—	Magnetic field
காந்தப் பாயம்	—	Magnetic flux
கிரிட், கியூரி, கிராம் அணு	—	Grid, Curie, Gram atom
குமிழ்க்கலம்	—	Bubble chamber
குழுத் திசைவேகம்	—	Group velocity
குறுக்கீட்டு விளைவுமானி	—	Interfero meters
குவிமுகப்படுத்துதல்	—	Focussing
குத்துயரம்	—	Altitude
குத்துயர விளைவு	—	Altitude effect
குவான்டம்	—	Quantum
கூடுமாதிரியமைப்பு	—	Shell model
கூட்டுக்கரு	—	Compound nucleii
கூலூம்	—	Coulomb
கெய்கர்-நட்டால் விதி	—	Geiger-Nattal Law
கெய்கர்-முல்லர் எண்ணி	—	Geiger-Muller Counter

கோட்பாடு	—	Theory
கோண உந்தம்	—	Angular momentum
கோப்புகள்	—	Frames of reference

ச

சறுக்குப் பெயர்ச்சி	—	Shear
சரிச்சீர்ப் பிளவு (சமச்சீர்ப் பிளவு)	—	Symmetric fission
சட்டம்	—	Frame
சாட்விக்	—	Chadwick
சார்புக் கொள்கை—தனி	—	Special Relativity
,, —பொது	—	General Relativity
சிங்ரோட்ரான்	—	Synchrotron
சிக்கல் எண்	—	Complex number
சிதைவு	—	Decay
சிதைவு மாறிலி	—	Decay constant
சிவப்பு நிற வரி	—	Red spectral line
சிர்சோனியம்	—	Zirzonium
சுழி	—	Zero
சுருள்பாதை	—	Spiral path
சுயமின்சரிவு	—	Self-quenching
சுழல்திறன்	—	Moment
செயலீடுகள்	—	Reactions
—ஆற்றல் வெளியிடும்	—	Exo-ergic reactions
—ஆற்றல் உட்கவர்	—	Endo-ergic reactions
—வெப்பக் கரு	—	Thermonuclear reactions
—வேதியல்	—	Chemical reactions
—போட்டோச் சிதைவு	—	Photo disintegration reactions
செயலூக்கம்	—	Activity
செரின்கோப் காட்டி	—	Cerenkov Detector
சேய்த் தனிமம்	—	Daughter element
சேய்க் கரு	—	Daughter nucleus
சைக்ளோட்ரான்	—	Cyclotron

ட

டிரிடியம்	—	Tritium
டியூட்ரான்	—	Deuteron
டிரேசர்	—	Tracer
டி பிராக்ளி	—	De Broglie

டி பிராக்லி அலைகளம்	—	De Broglie waves
டேவிசன்-ஜெர்மர்	—	Davison-Germer

த

தங்க இலை மின்காட்டி	—	Gold leaf electroscope
தணிப்பான்கள்	—	Moderators
தற்செயல் பிளவு	—	Spontaneous fission
தற்சுழற்சி	—	Spin
தற்சுழற்சிக் கோண உந்தம்	—	Spin anguler momentum
தாம்சன், G. P.	—	Thomson, G.P.
தாய்த் தனிமம்	—	Parent element
தாய்க் கரு	—	Parent nucleus
திசைவேகம்	—	Velocity
திரவத்துளி மாதிரியமைப்பு	—	Liquid drop model
தீப்பொறி கலன்	—	Spark chamber
துகள்கள்	—	Particles
துகள்கள்-α	—	α-Particles
துகள் முடுக்கிகள்	—	Particle acceleration
துகள் பாயங்கள்	—	Particle fluxes
துகள்-அலைநீளம்	—	Particle-wave length
துண்டங்கள்	—	Fragments
துணைக் காஸ்மிக் கதிர்கள்	—	Secondary cosmic rays
துத்தநாகச் சல்பைடு திரை	—	Zinc sulphate screen
தூண்டிய பிளவு	—	Induced fission
தேய்வு விதிகள்	—	Law of Decay
தொடர் γ-கதிர்வீச்சு	—	Continuous γ-radiation
தொடர்வினை	—	Chain reaction
தோரியம்	—	Thorium

ந

நண்டு நெபுலா	—	Crab Nebula
நியூக்ளியான்	—	Nucleon
நியூட்ரான்	—	Neutron
நியூட்ரினோ	—	Nutrino
நிலைமின் முடுக்கி	—	Electrostatic accelerator
நிறைக்குறை	—	Mass defect
நிறை ஆற்றல்	—	Mass energy
நிறைமாற்றம்	—	Mass variation
நிறை நிரல்மானி	—	Mass spectrometer
நிறைப் பகிர்வு	—	Distribution of mass

நிரல்மானி—α-கதிர்	—	α-ray spectrometer
,, —β-கதிர்	—	β-ray spectrometer
நிகழ்திறன்	—	Probability
நிக்கல் படிகம்	—	Nickel crystal
நிலைமச் சட்டம்	—	Inertial frame
நிலையற்ற சமநிலை	—	Unstable equilibrium
நீல்ஸ்போர்	—	Neils Bohr
நெடுக்கம்	—	Range
நேர்க்கோட்டு முடுக்கிகள்	—	Linear accelerators
நேரியல் துகள் முடுக்கி	—	Linear accelerator
நேர்க்கோட்டு உந்தம்	—	Linear momentum
நேர்க்கோட்டுச் சீரிசை அலைவி	—	Simple harmonic oscillator
நேர்க்குத்துப் படுகை மாறிலி	—	Normalisation constant
நேரச் சார்பற்ற ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாடு	—	Time Independent Schrodinger equation
நைட்ரஜன்	—	Nitrogen

ப

பருப்பொருள் அலைகள்	—	Matter waves
பரப்பு அலைகள்	—	Surface oscillations
பரப்பு இழுவிசை	—	Surface tension
பயன் தொடக்க ஆற்றல்	—	Threshold energy
பகுதி	—	Differential coefficient
படிமாற்றச் சமன்பாடுகள்	—	Transformation equations
பவுலி	—	Pauli
பாரியான்	—	Baryon
பாரியான் எண்	—	Baryon number
பார்ன்	—	Barn
பாசிட்ரான்	—	Positron
பிளாஸ்மா	—	Plasma
படிக நிரல்மானி	—	Crystal spectrometer
ஃபிட்ஸ்ஜெரால்டு	—	Fitsgerald
பிணைப்பு ஆற்றல்	—	Binding energy
பிளவுக் குணகம்	—	Fission coefficient
பிளாங்க்	—	Plank
பீட்டாட்ரான்	—	Betatron
புரோட்டான்	—	Proton
புகைப்படக் கூழ்	—	Photographic emulsion
புவிகாந்த தீர்க்கரேகை	—	Geomagnetic latitude
புற யுரேனியத் தனிமங்கள்	—	Transuranic elements

புதுமையான துகள்கள்	—	Strange particles
பெயின் பிரிட்ஜ்	—	Bain bridge
பெரிலியம்	—	Berilium
ஃபெதர்	—	Feather
ஃபெர்மி	—	Fermi
பெக்யூரல்	—	Becquairel
பேசொட்ரான்	—	Phasotron
பொலோனியம்	—	Polonium
பொருளருகு வில்லை	—	Object lens (objective)
பொறிகலம்	—	Spark chamber
பொவல்	—	Powell
ஃபோடான்	—	Photon
போர் முதல் வட்டப்பாதை ஆரம்	—	Radius of Bohr's first orbit
போல்ட்ஸ்மான் மாறிலிகள்	—	Boltzmann constants
பையான்	—	Pion

ம

மாறிலி	—	Constant
மார்லி	—	Morley
மாக்ஸ்பார்ன்	—	Max Born
மாறுநிலை நிறை	—	Critical mass
மாறுநிலை அளவு	—	Critical size
மின்னழுத்தம்	—	Potential
மின்னழுத்த அரண்	—	Potential barrier
மின்னிறக்கம்	—	Discharge
மின்துடிப்பு	—	Voltage pulse
மின்புலம்	—	Electric field
மின்சரிவு	—	Quenching
மியூவான்	—	Muon
மிளிர்தல் காட்டி	—	Scintillation detector
மீநுண் வரியமைப்பு	—	Fine structure
மீசான்கள்	—	Mesons
மீசோட்ரான்	—	Mesotron
மீட்சியுறு மோதல்	—	Elastic collision
மீச்சூடேற்றப்பட்ட	—	Super heated
முகப்பரப்பு	—	Surface
முதன்மைக் காஸ்மிக் கதிர்கள்	—	Primary cosmic rays
மென்கூறு	—	Soft component
மேகக் கலம்—வில்சன்	—	Wilson's cloud chamber

மைக்கல்சன் — Micholson
மோதல் — Collision

யு

யுரேனியம் — Uranium
யுகாவா — Yukawa

ரு

ருதர்ஃபோர்டு — Rutherford
ரேடியம் — Radium
ரேடான் — Radon

ல

லாரென்ட்ஸ் — Lorentz
லிதியம் — Lithium
லெப்டான்கள் — Leptons

வ

வட்டப்பாதை முடுக்கி — Cyclic accelerator
வளைபந்து வடிவம் — Doughnut shaped
வழிகாட்டி அலை — Guide wave
வான்டிகிராப் நிலைமின்னியற்றி— Vandegraph generator
வான் ஆலன் கச்சை — Van Allon belt
விளைபொருள் (கருப்பிளவு) — (Fission) product
விளைக்கரு (கருப்பிளவு) — (Fission) nucleus
விளிம்பு வளைவு — Diffraction
விகிதக் கணிப்பான் அல்லது எண்ணி — Proportional counter
வீழ்படிவு — Precipitate
வெப்பக் கரு ஆற்றல் — Thermo nuclear energy
வெப்ப நியூட்ரான் — Thermo neutron
வெப்பமாறாப் பெருக்கம் — Adiabatic expansion
வெளி — Space
வெளி எதிரொளிப்பு — Parity (space reflection)
வைசாக்கரின் நிறைக்கோவை— Weiscacker's Mass Formula

ஹ

ஹாட்ரான்	—	Hadrons
ஹெய்சன்பெர்க்	—	Heisenberg
ஹெர்மிஷியன்	—	Hermitian
ஹைபெரான்கள்	—	Hyperons

ஷ

ஷ்ரோடிஞ்சர்	—	Schrodinger